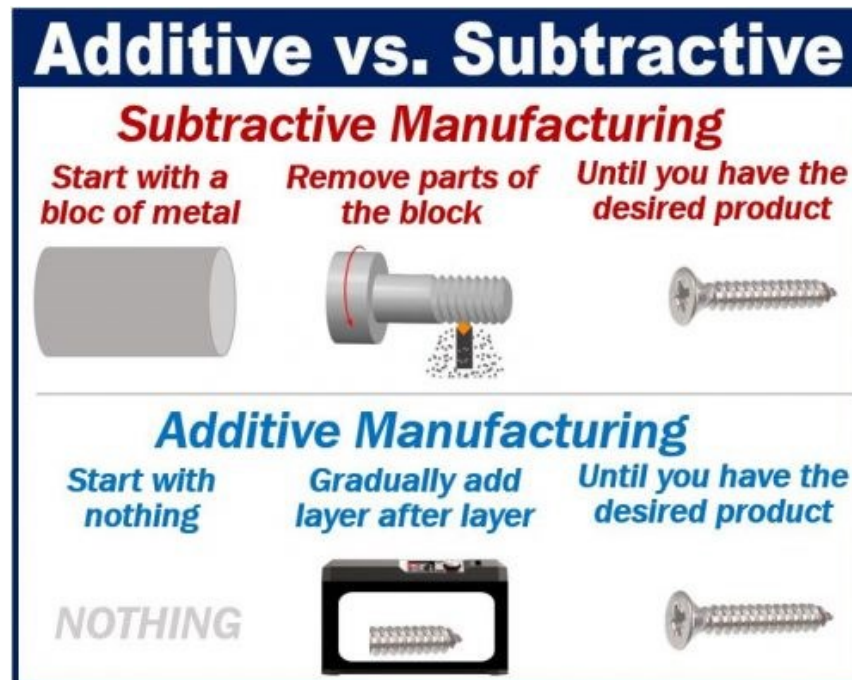


# Additive Manufacturing (AM) Terminology

Known by many names:

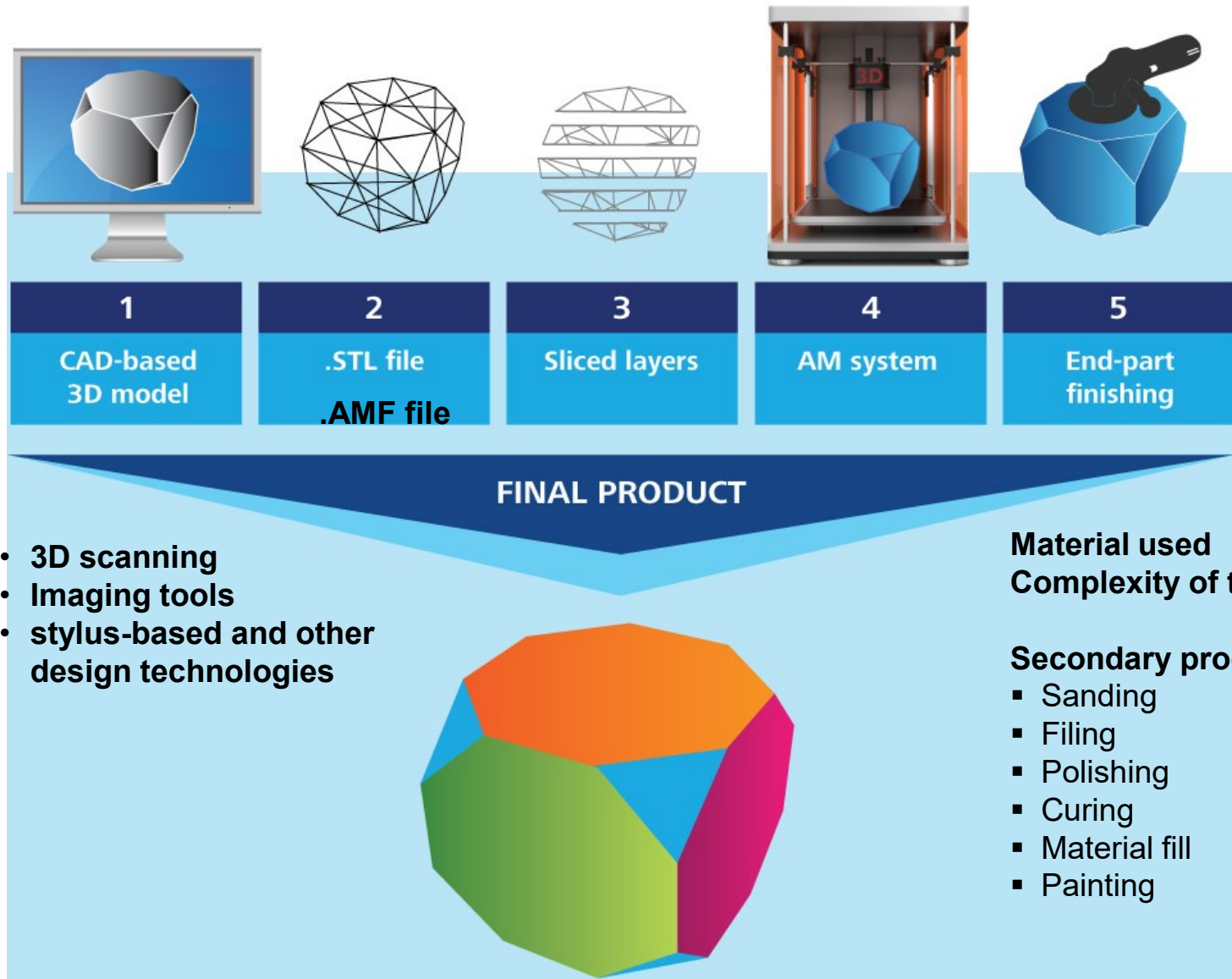
- 3D Printing
- Rapid Prototyping
- Rapid Tooling
- Rapid Technologies
- Rapid Manufacturing
- Advanced Manufacturing
- Additive Fabrication
- Additive Layer Manufacturing
- Direct Digital Manufacturing
- Direct Manufacturing



# Additive Manufacturing (AM) / 3D Printing

- A process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methodologies
  - 3D프린팅: 디지털디자인 데이터를 이용, 소재를 적층해 3차원 물체를 제조하는 프로세스
  - 적층제조(Additive Manufacturing, AM): 재료를 자르거나 깎아 생산하는 절삭가공(subtractive manufacturing)과 대비되는 개념으로 공식 용어
- Group of technologies that create products through the addition of materials (typically layer by layer) rather than by subtraction (through machining or other types of processing)

# Additive Manufacturing (AM) Process Flow



# 3D 프린터 역사 (1)

- 1984 : 3D Systems사 Charles Hull이 SLA 방식 3D 프린터 최초 개발
- 1986 : SLA 방식 특허 획득
- 1988 : SLA 방식 첫 상용화, LOM 방식 특허 획득
- 1989 : SLS 방식 특허 획득
- 1990 : FDM 방식 첫 상용화
- 1992 : FDM 방식 특허 획득, SLS 방식 개발, SLA 방식 Layer by Layer 방법으로 파트 완성
- 1993 : MIT에서 3차원 프린팅 기술(잉크젯 기반) 특허 획득, 3DP 방식
- 1996 : Stratasys "Genisys", 3D Systems "Actua2100", Z Corporation "Z402" 출시
- 2005 : 첫 고선명 컬러 3D 프린터인 Z Corporation "Z510" 출시, RepRap의 오픈소스 기반 3D 프린터 소개
- 2006 : SLS 방식 제조 대량 커스텀화, Object사에서 다양한 재료를 프린팅 가능한 제품 출시



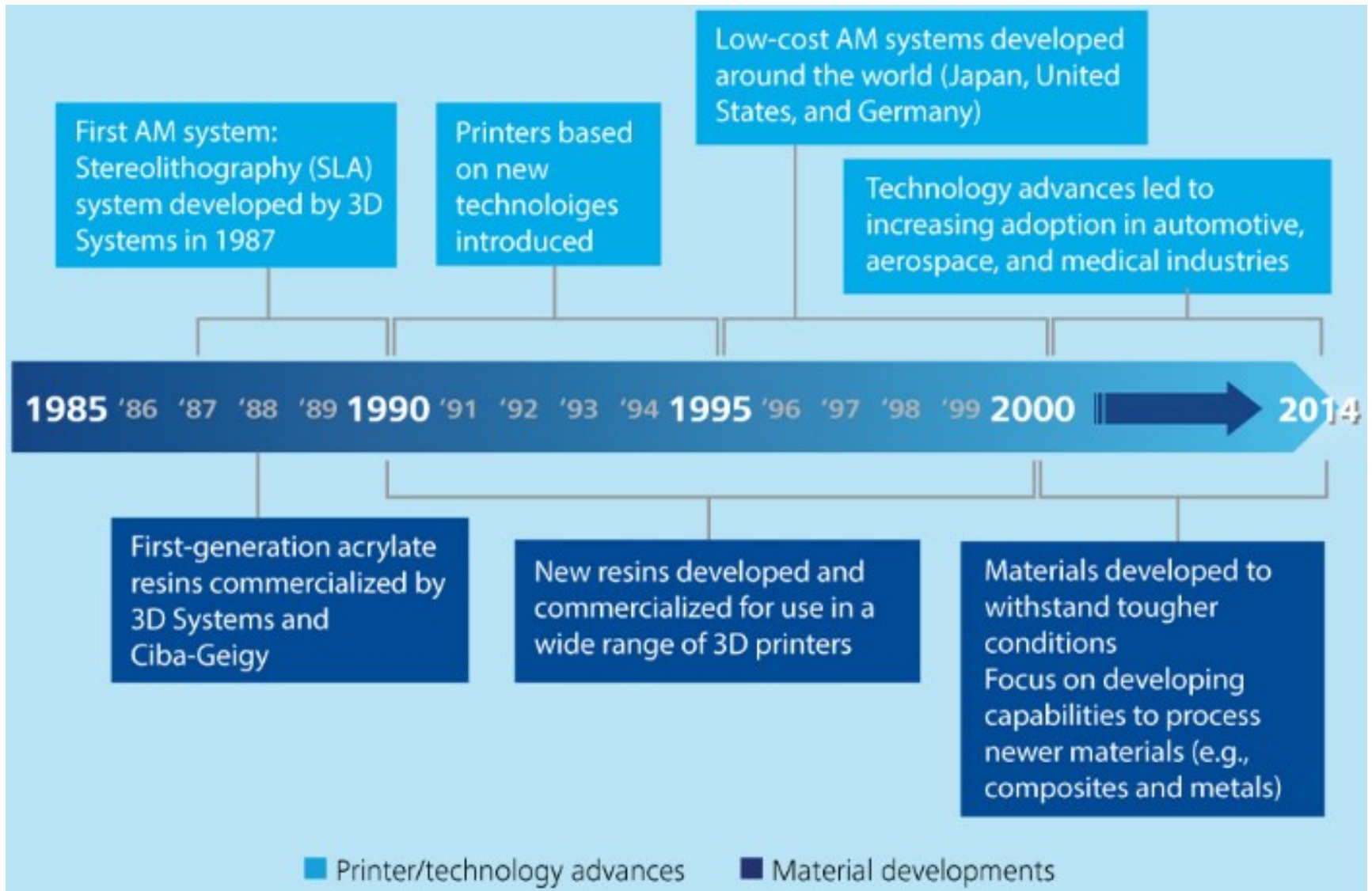


## 3D 프린터 역사 (2)

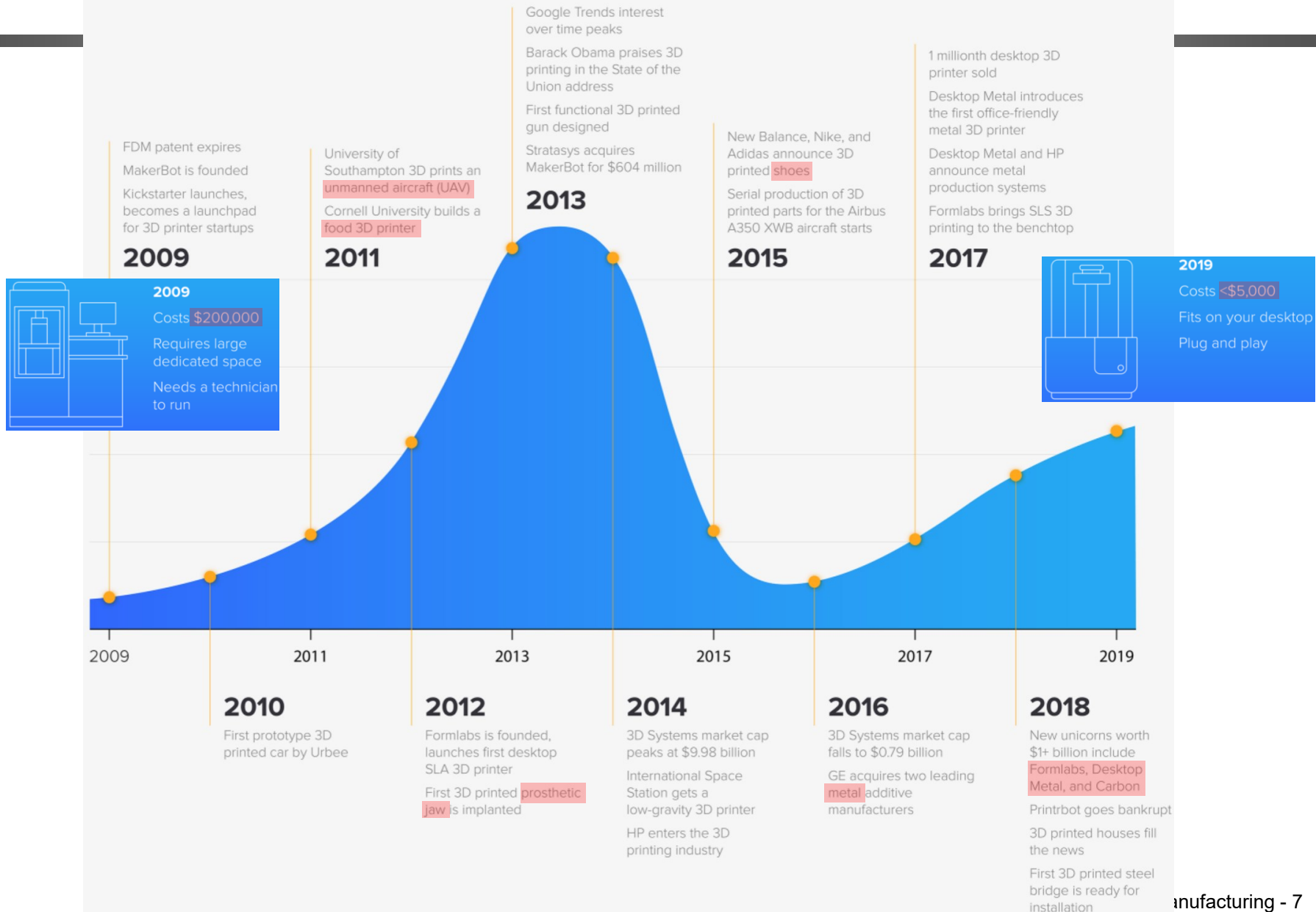
- 2008 : [RepRap](#)에서 첫 Self-Replicating 프린터 릴리즈, Shapeways의 DIY 서비스
- 2009 : MakerBot 3D 프린터 DIY Kit 시장에 출시
- 2010 : Southampton 대학 기술자들이 세계 최초 3D 프린터로 제작한 시험용 비행체 비행 성공
- 2011 : 세계 최초 3D 프린터로 제작한 자동차 소개
- 2012 : 네덜란드에서 3차원 프린터로 인공턱 구현, FDM 방식 특허 20년 기간 만료 대중화 진입 촉진
- 2013 : 줄기세포 기반 3D 프린터 인공장기 소개, 권총 3D CAD 도면 인터넷 업로드(다운로드)
- 2014 : SLS 방식 특허기간 만료로 FDM 방식과 같이 대중화에 많은 기여 예상

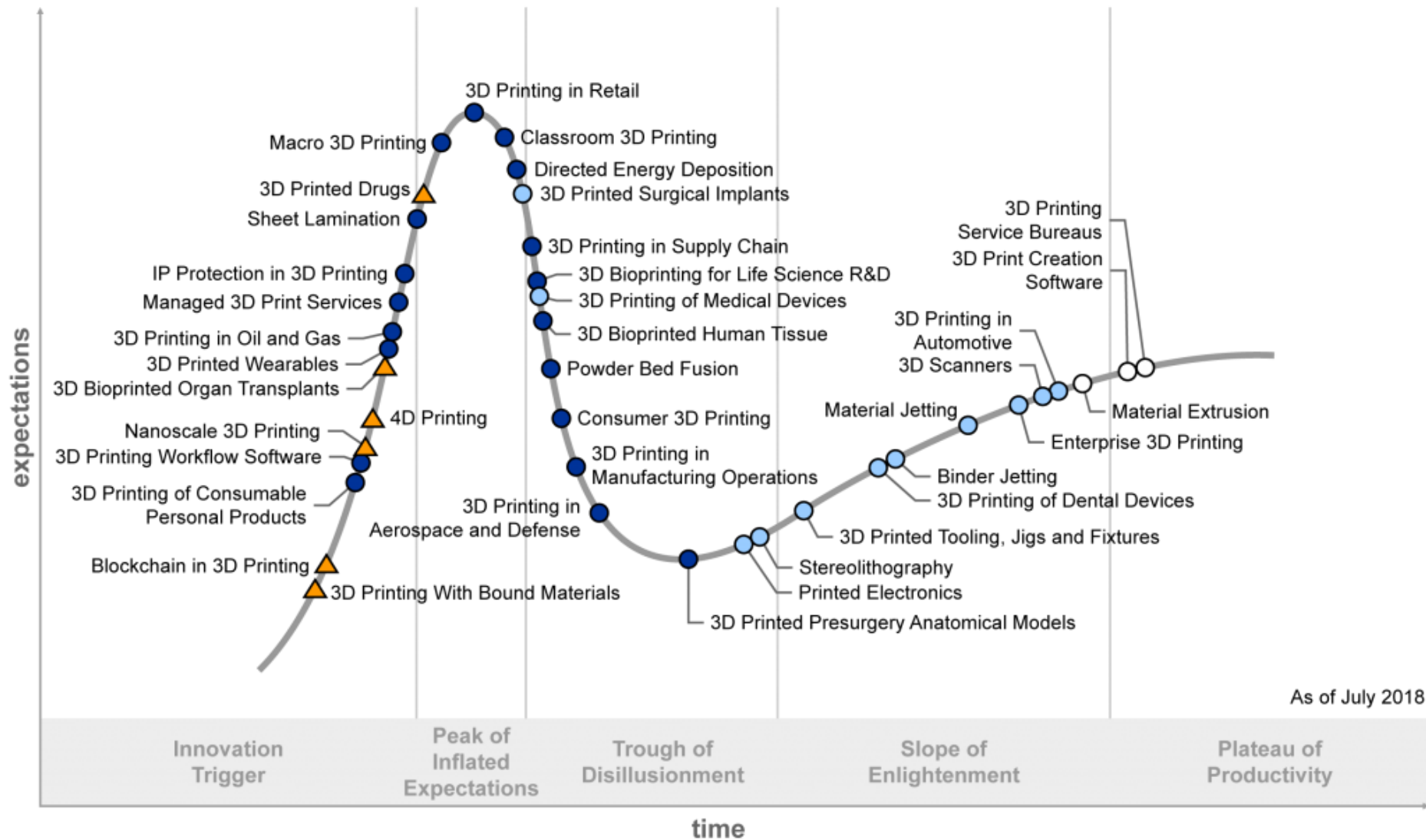
# Evolution of AM Technology

speed of processing  
complexity of design  
variety of materials used



# After its initial hype burst, the 3D printing industry is healthier than ever



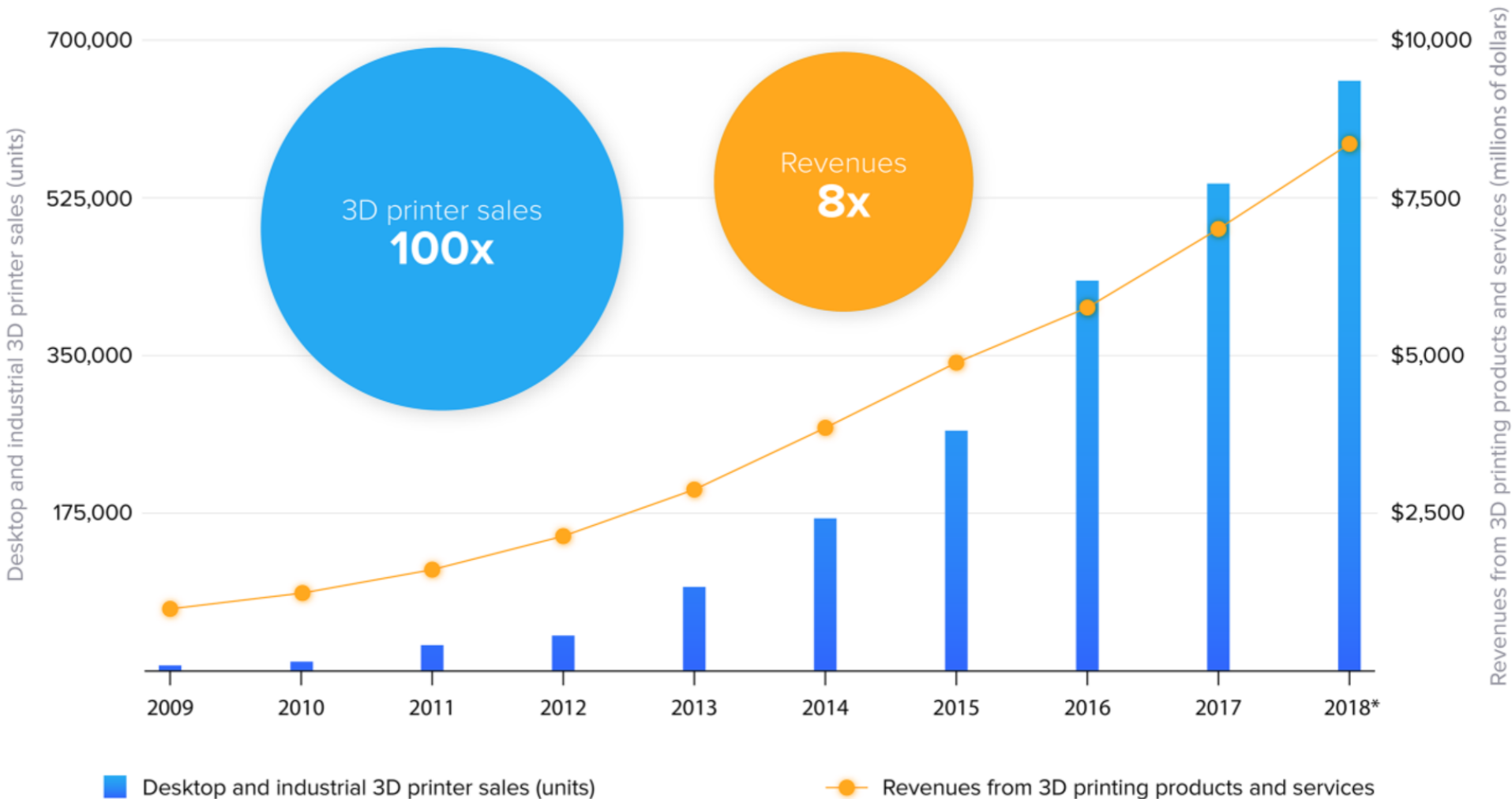


Plateau will be reached:

○ less than 2 years    ● 2 to 5 years    ● 5 to 10 years    ▲ more than 10 years    ⊗ obsolete before plateau

© 2018 Gartner, Inc.

# As 3D printers became increasingly accessible, sales and revenues from 3D printing skyrocketed



Source: Wohler's Report, 2018 stats are estimates

# Additive Manufacturing Materials

3D 프린팅 작동 원리와 특징			
원료	기술명	원리	특징
고체 (ABS, PLA 등)	FDM (Fused Deposition Modeling: 압출 적층 조형)	<ul style="list-style-type: none"> <li>고체 필라멘트(실)형태의 열가소성 플라스틱을 노즐 안에서 녹인 후 분사하여 쌓아 올림</li> <li>레이저를 사용하지 않는 단순 구조</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>스트라타시스(Stratasys)사 개발</li> <li>내구성이 높고 강도가 강하며 장비가격과 유지비용이 저렴하고 원료수급 용이</li> </ul>
분말 (나일론, 유리, 세라믹, 티타늄 등 다양)	SLS (Selective Laser Sintering: 선택적 레이저 소결 조형)	<ul style="list-style-type: none"> <li>기능성 고분자나 금속 파우더 원료를 조형판에 공급하고, 레이저로 경화시켜 레이어 형성</li> <li>레이어가 형성되면 그 위에 파우더를 얇게 뿌리고 다시 레이저로 새로운 막을 형성하여 쌓아 올림</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>텍사스 대학(University of Texas system)연구진 개발</li> <li>조형속도가 빠르고 금속을 포함한 다양한 원료 사용 가능</li> <li>장비가 비싸고 유지비용이 많이 소요</li> </ul>
액체 (포토폴리머 플라스틱)	SLA (Stereo lithographic Apparatus: 광경화 수지 조형)	<ul style="list-style-type: none"> <li>빛을 받으면 고체로 변하는 광경화성 수지에 UV 레이저를 주사하여 경화시켜 레이어 형성</li> <li>레이어가 형성될 때마다 받침대가 한 층 두께만큼 하강하며 쌓아 올림</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>3D 시스템즈(3D SYSTEMS)사가 개발</li> <li>정교한 출력 가능</li> <li>장비가 비싸며 유지비용이 많이 들고 원료선택이 제한적</li> </ul>

# 재료와 특성

종류	설명	주요특징	용융온도
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene 5대 범용수지로서 가공성이 좋으며 기계적특성이 우수함 다양한 종류가 있으며 대부분의 가전 제품에 적용	조형시 스트링현상이 없고 디테일한 모사가 가능하여 산업용 3D프린터의 기본소재 수축율이 높아 조형시 비틀림, 변형, 들뜸발생 내열도가 우수하며 충격에 강함 다듬질이나 도색성의 후가공에 용이 도금가능, 접착성 우수 특유의 냄새발생	215~250도
PLA	Poly-Lactic Acid(폴리락트산) 옥수수에서 추출한 녹말을 발효시켜 젖산을 응축하고 고분자화 하여 만든 친환경소재	수축율이 낮아 크기가 큰 조형에 유리 레이어간 접착력 우수(레프트,서포트 제거난해) 히팅베드 없이도 출력가능 단면형상이 다수의 폐곡선일 경우 스트링 발생 내열도가 낮으며 후가공이 난해함 옥수수타는냄새, 스트링의 분진화	180~220도
PVA	Polyvinyl alcohol	수용성소재로 서포트 소재로 우수 흡습성이 강하여 단시간의 노출에도 재료손상 보관 및 프린팅 조건난해	220~230도



# Additive Manufacturing Process (1)

- **재료 압출 방식 (Material extrusion)**
  - 직경 1~2 mm의 얇은 관 형태의 플라스틱 필라멘트를 노즐 내에서 가열 및 압출하여 적층하는 방식으로 미국 내에서 일반 사용자용 제품 군부터 전문가 및 산업용 제품 군까지 상용화가 가장 잘 이루어지고 있다. 이 기술은 1989년 S. Scott Crump에 의하여 발명되어 특허가 출원된 후 Stratasys에 의해 상용화되었다. 이 후 RepRap과 Fab@Home와 같은 오픈 소스 개인용 3D 프린터 개발 프로젝트 등으로 이 방식을 이용한 저가의 3D 프린팅 기기 개발 및 확산되었음
- **분말 적층 용융 방식 (Powder Bed Fusion)**
  - 분말 형태의 소재를 특정 두께로 평편하게 깔아 레이저 (Laser) 및 전자 빔 (Electron beam) 형태의 열원을 조사하여 단면을 따라 용융시켜 구조물을 생성하는 방식으로 금속 3D 프린팅에 주로 사용된다. 미국 내에서 관련 연구가 가장 활발한 방식으로 다양한 금속 소재 개발과 정밀도 및 속도를 높이기 위한 연구가 진행 중임



# Additive Manufacturing Process (2)

- **광중합 방식 (Photo Polymerization)**

- 빛에 의해 경화되는 액체형태의 광경화성 수지 (Photo-Polymer)에 자외선을 조사해 단면을 따라 경화시켜 적층하는 방식으로 3D 프린팅 기기 중 가장 먼저 발명. 이 기술은 Charles W. Hull에 특허 출원되어 3D Systems사에 의하여 상용화. 광경화성 수지의 약한 기계적 특성으로 인하여 제작된 제품을 실사용이 어려운 한계. 하지만 상대적으로 고속 제작이 가능하고 제작된 제품이 높은 정밀도. 현재 미국 내에서는 기계적 특성을 높여 실사용이 가능한 소재가 개발되고 있고, 제작 속도를 더욱 높인 기기의 개발이 이루어지고 있음.








- **재료 분사 방식 (Material Jetting)**

- 일반적인 잉크젯 프린터와 같은 방식으로 재료를 프린트 헤드에서 원하는 패턴을 따라 분사하여 경화시키는 방식. 이 방식은 Objet Geometries사에서 상용화. 현재 Stratasys사는 멀티헤드 방식의 프린터를 개발하여 출력 속도를 높이고, 다양한 재료 및 색상의 재료를 개발함으로써 사용자가 원하는 색상 및 기능을 가진 제품의 제작이 가능한 3D 프린터를 개발 하고 있음.

# Additive Manufacturing Process (3)

- **접착제 분사 방식 (Binder Jetting)**
  - 분말 형태의 소재 위에 액상의 접착제를 뿌려 2차원 단면을 생성하는 방식으로 Massachusetts Institute of Technology 에서 개발되어 Z Corporation에서 상용화되었다. 이 방식은 제작 중 지지구조물 (support structure)을 생성하지 않는 특징. 최근 ExOne사는 금속 및 세라믹 소재의 다양한 소재의 분말을 개발하고 있음.
- **박판 합착 방식 (Sheet Lamination)**
  - 얇은 판형의 소재를 2차원 단면을 따라 절단하여 이전 층의 재료와 합착하는 방식으로 종이, 박판 수지 또는 금속이 소재로 사용. 박판을 접착시키기 위해서 접착제를 사용하거나 열 또는 초음파가 사용됨.
- **직접 용착 방식 (Direct Energy Deposition)**
  - 와이어 형태 또는 분말 형태의 재료를 노즐을 이용하여 공급하는 동시에 열원을 이용하여 용융시켜 구조물을 제작하는 방식으로 기존에 존재하는 구조물 표면에 직접 적층이 가능한 특징.

# ISO TC261, ASTM F42

	<b>Binder Jetting</b>	노즐을 통해 분사된 잉크가 경화물질에 분사/증착되어 적층되는 방식 (잉크: Bonding agent 역할)
	<b>DED</b>	레이저, 전자빔, 플라즈마아크 등의 에너지를 이용하여 재료를 녹여서 붙여나가는 적층방식 (금속분말소재와 가스사용)
	<b>Material Extrusion</b>	고온으로 가열한 재료를 다이스(노즐)를 통해 압력을 가하여 압출하여 적층하는 방식 (FDM/FFF)
	<b>Material Jetting</b>	프린터 헤드를 통해 액체원료를 분출시키고 자외선으로 경화시키는 방식 (Polyjet, MJM)
	<b>PBF</b>	Powder Bed상의 고제입자를 레이저나 전자빔으로 가열하여 고형화 하는 방식 (SLS)
	<b>Sheet Lamination</b>	얇은 필름형태의 재료를 적층하여 접착하는 방식 (종이, 필름)
	<b>Vat Photo-polymerization</b>	광경화성수지(액상)에 빛을 조사하여 경화가되는 원리를 이용하는 방식 (DLP, SLA)

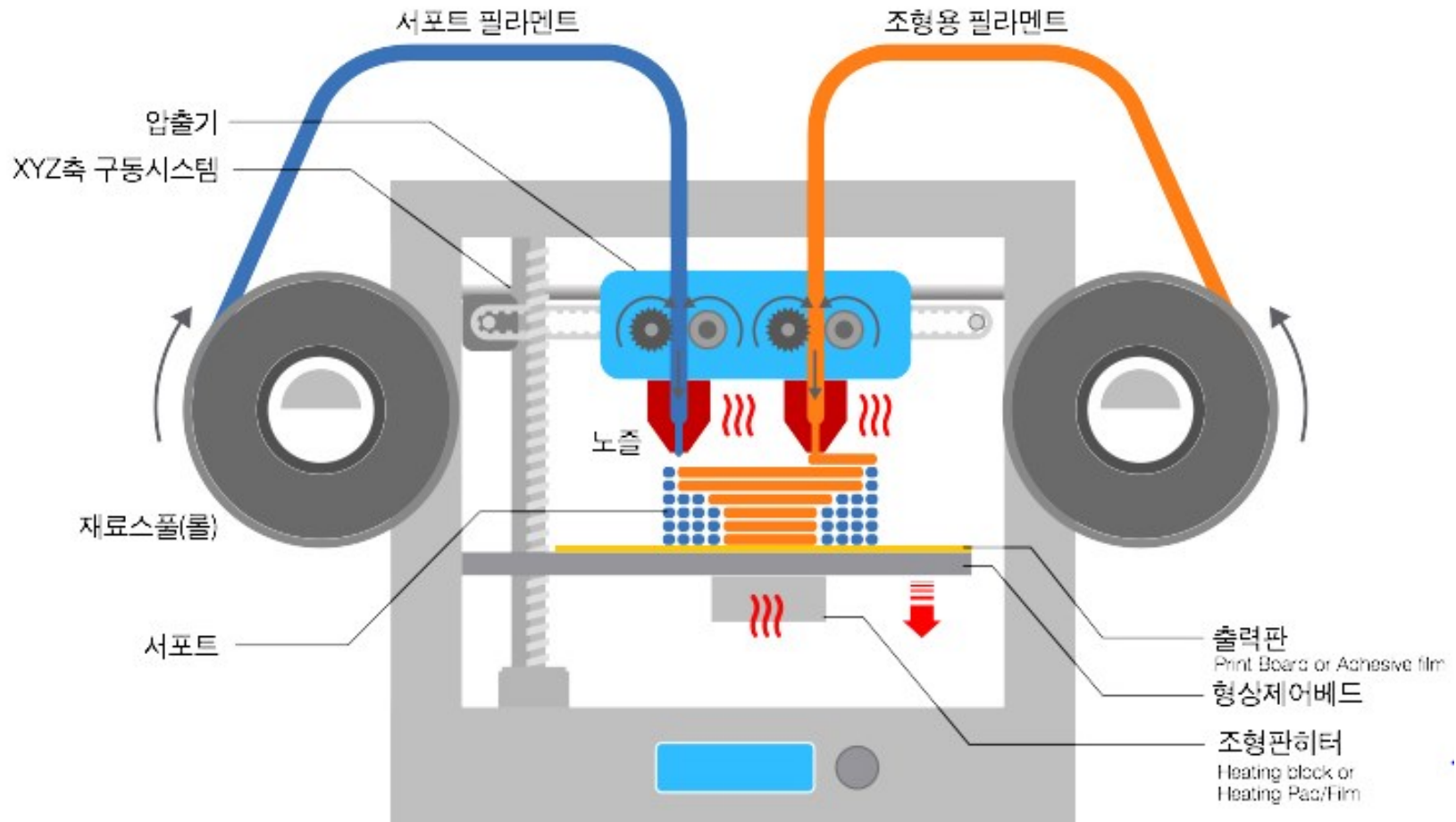
<http://www.veltz3d.com>

# 재료압출식 3D프린터

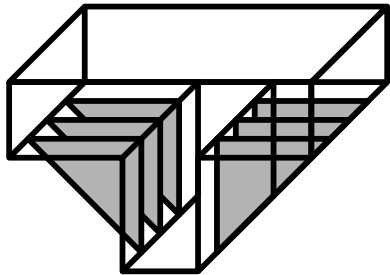


Material Extrusion  
FDM/FFF

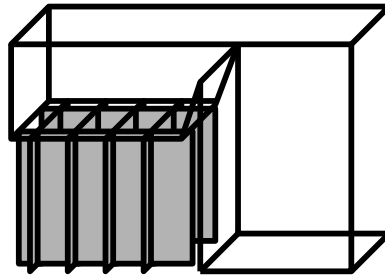
와이어 형상의 플라스틱 재료를 가열하여 노즐을 통해 압출하여 적층하는  
방식의 3D프린터



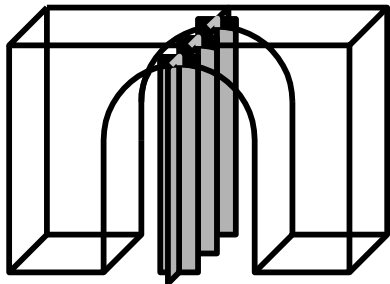
# Support Structures in the SL Process



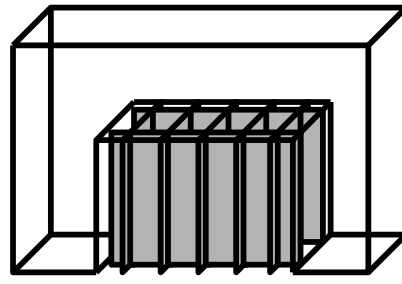
(a) Gusset



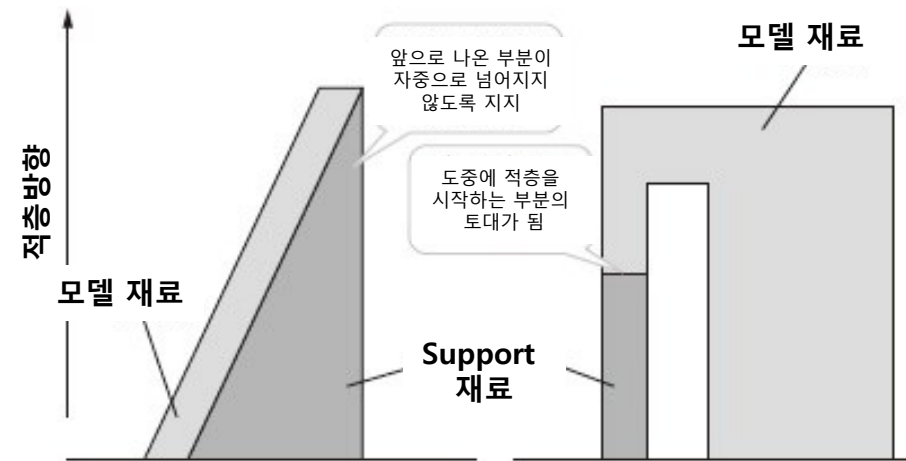
(b) Island



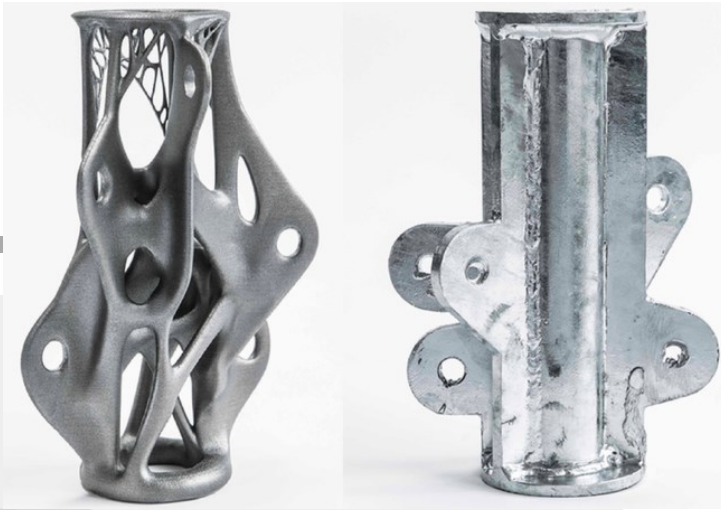
(c) Ceiling within a arch



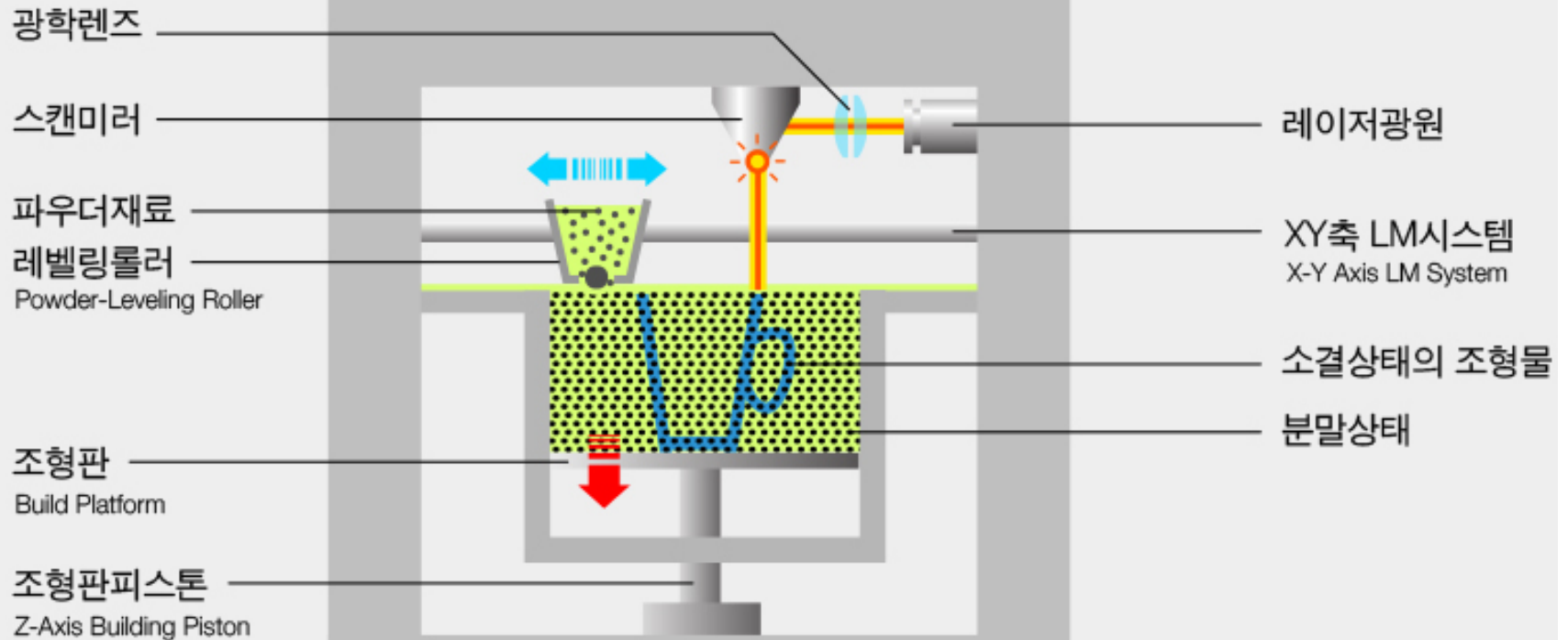
(d) Ceiling



# SLS 3D프린터



Powder Bed Fusion  
SLS

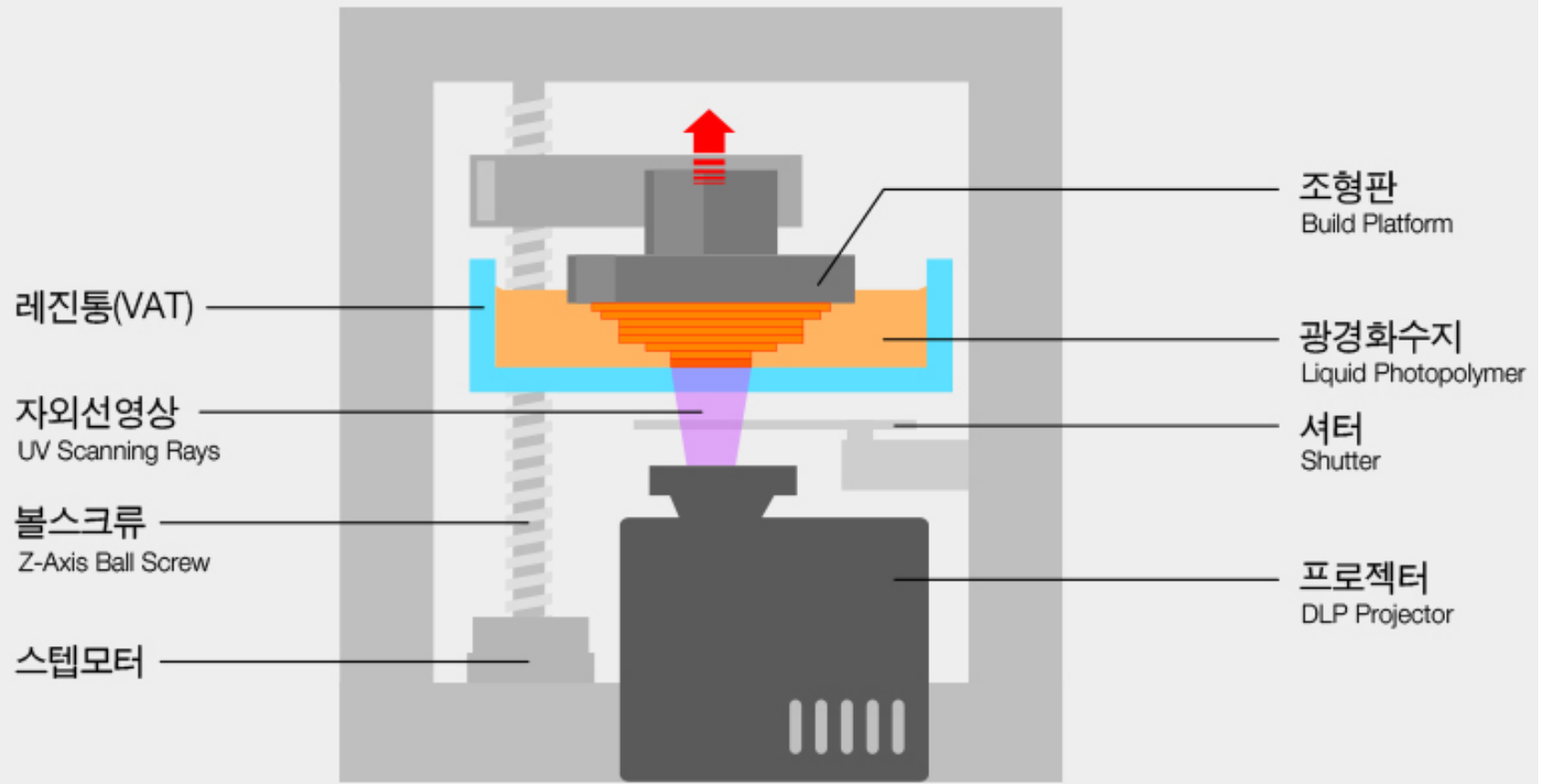


# 포토폴리머용 3D프린터



## Vat Photopolymerization DLP

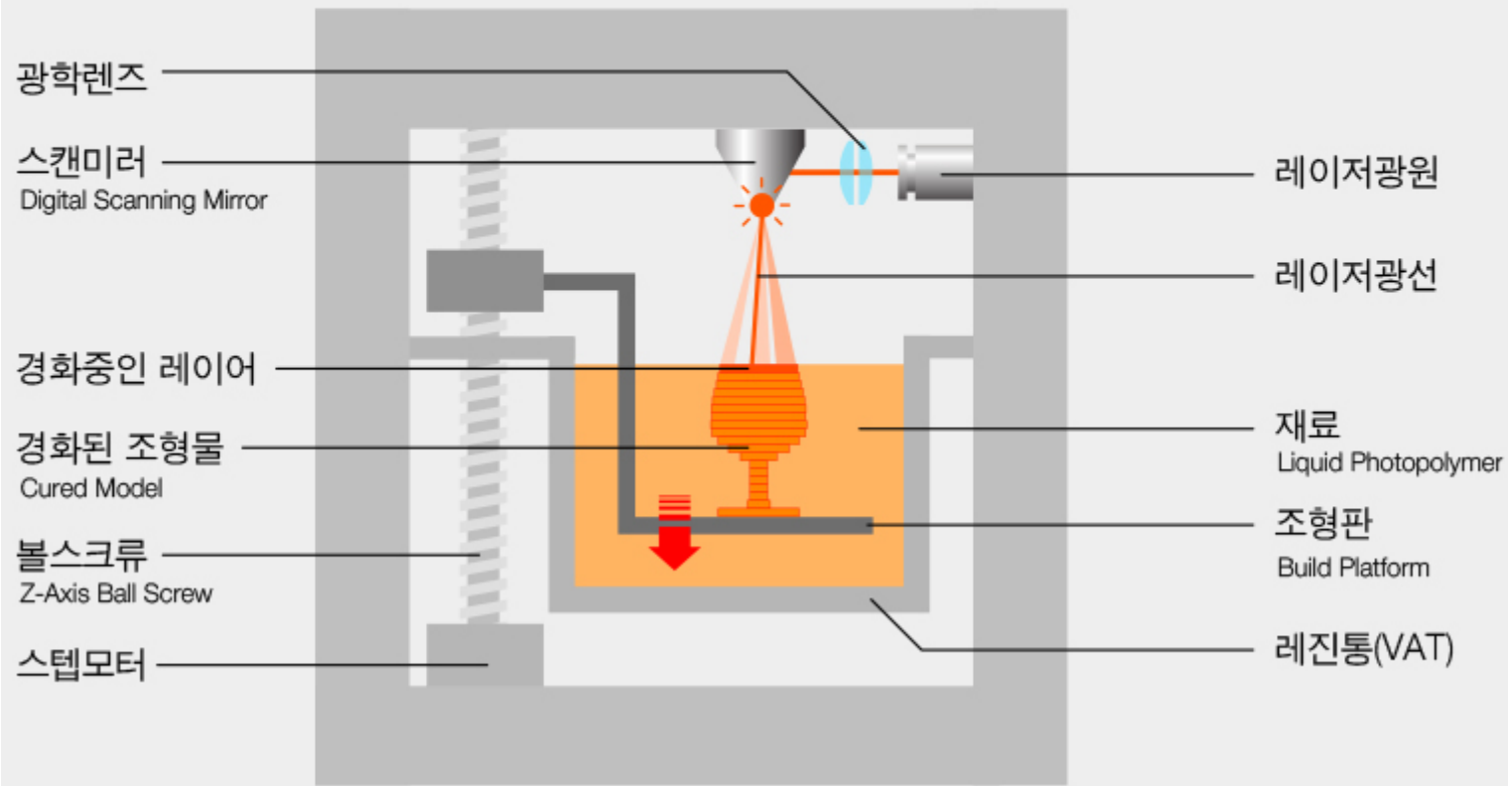
Resin(Polymer)을 채운 투명재질의 VAT에 아랫쪽에 위치한 DLP에서 출력모델의 단면이미지를 투사하게되며 이때 Build Platform과 VAT사이의 공간에 있던 Resin이 경화되는 과정을 지속적으로 반복하면서 적층하는 원리



# SLA 3D프린터

광경화성 재료에 레이저광선을 투사하여 경화/적층하는 방식의 3D프린터

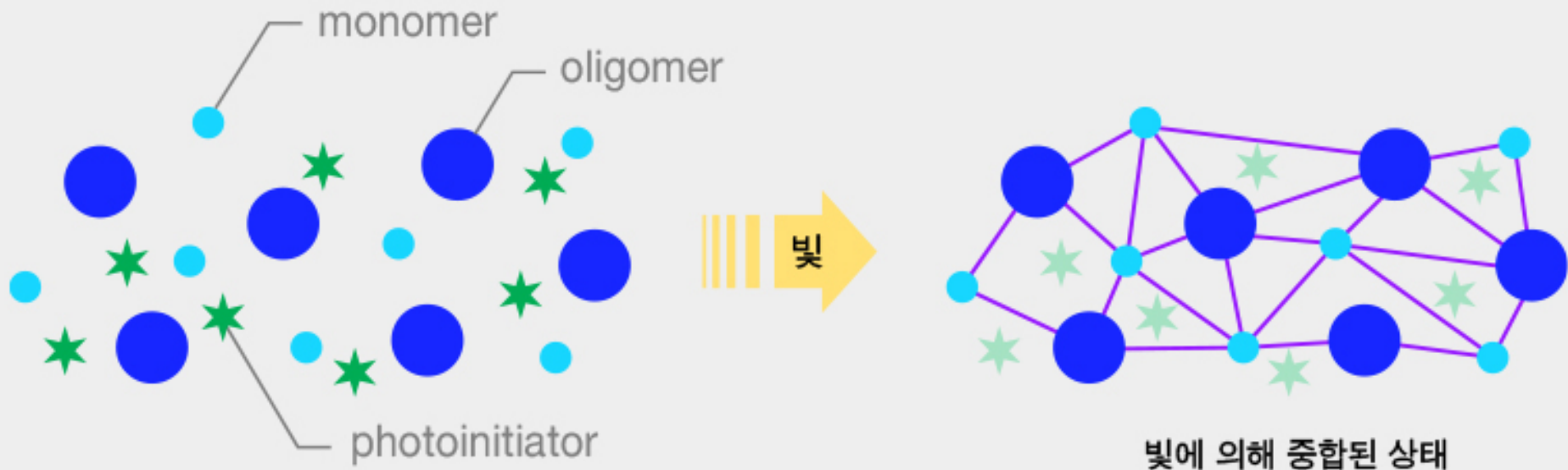
Resin(Polymer)을 채운 투명재질의 VAT에 조형판을 향하여 상부에서 레이저로 스캔하여 한층씩 Resin을 경화시키며 경화가 완료될 때마다 조형판이 지속적으로 아래로 내려가면서 이 과정을 반복하게 되는 원리





# Photo Polymer (광중합체)

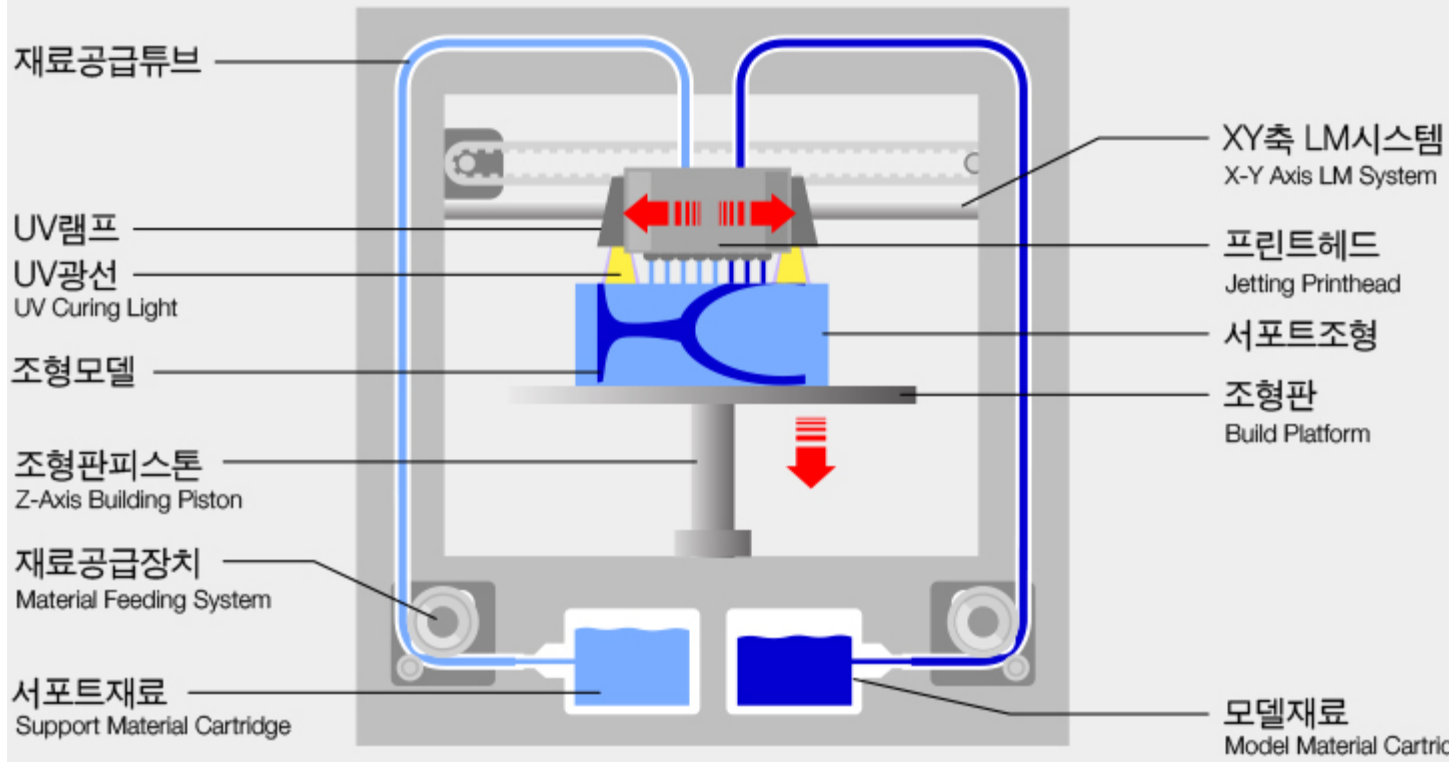
빛의 작용으로 분자구조에 변화가 일어나고 그 결과 물성변화가 생기는 고분자 또는 고분자 조성물을 의미.  
물성변화는 경화성, 용해성, 접착성, 화학적 친화성, 광학적성질 등 다양하며  
이렇게 변화되는 물성을 이용하여 광경화 수지를 합성하여 3D프린터의 소재로 사용.





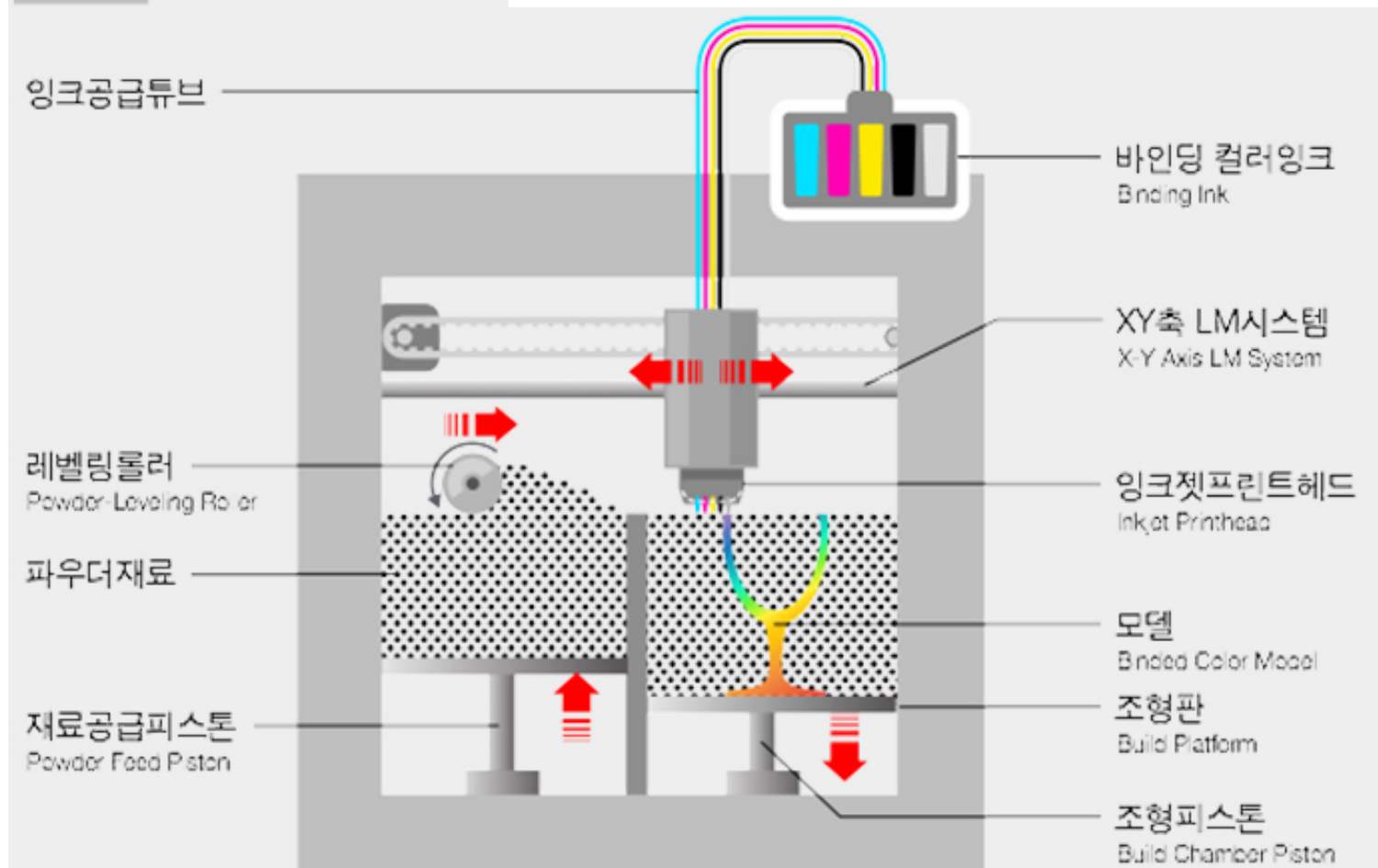
# Material Jetting / dispens Polyjet/MJM

Material Jetting방식 3D프린터의 구조와 원리 / Polyjet 출력물예시[stratasys]

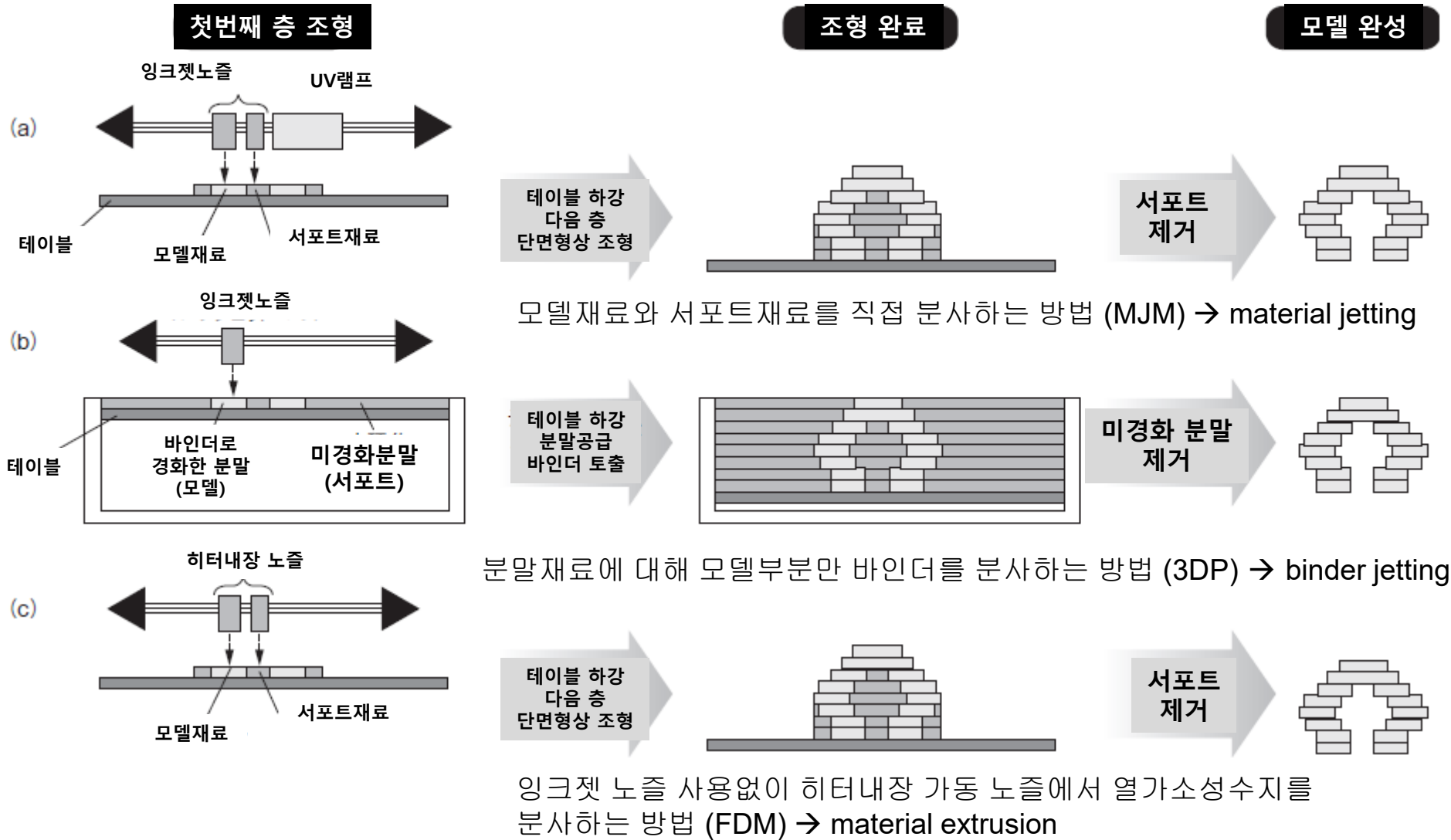


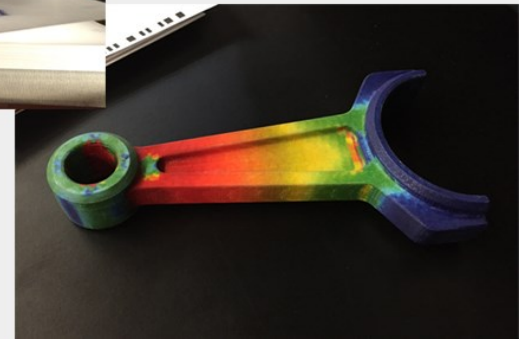
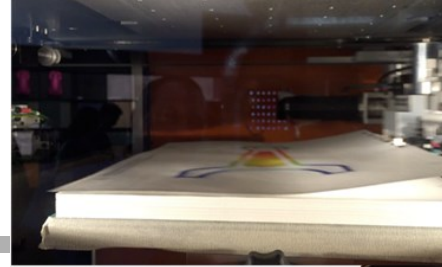


## Binder Jetting 3DP

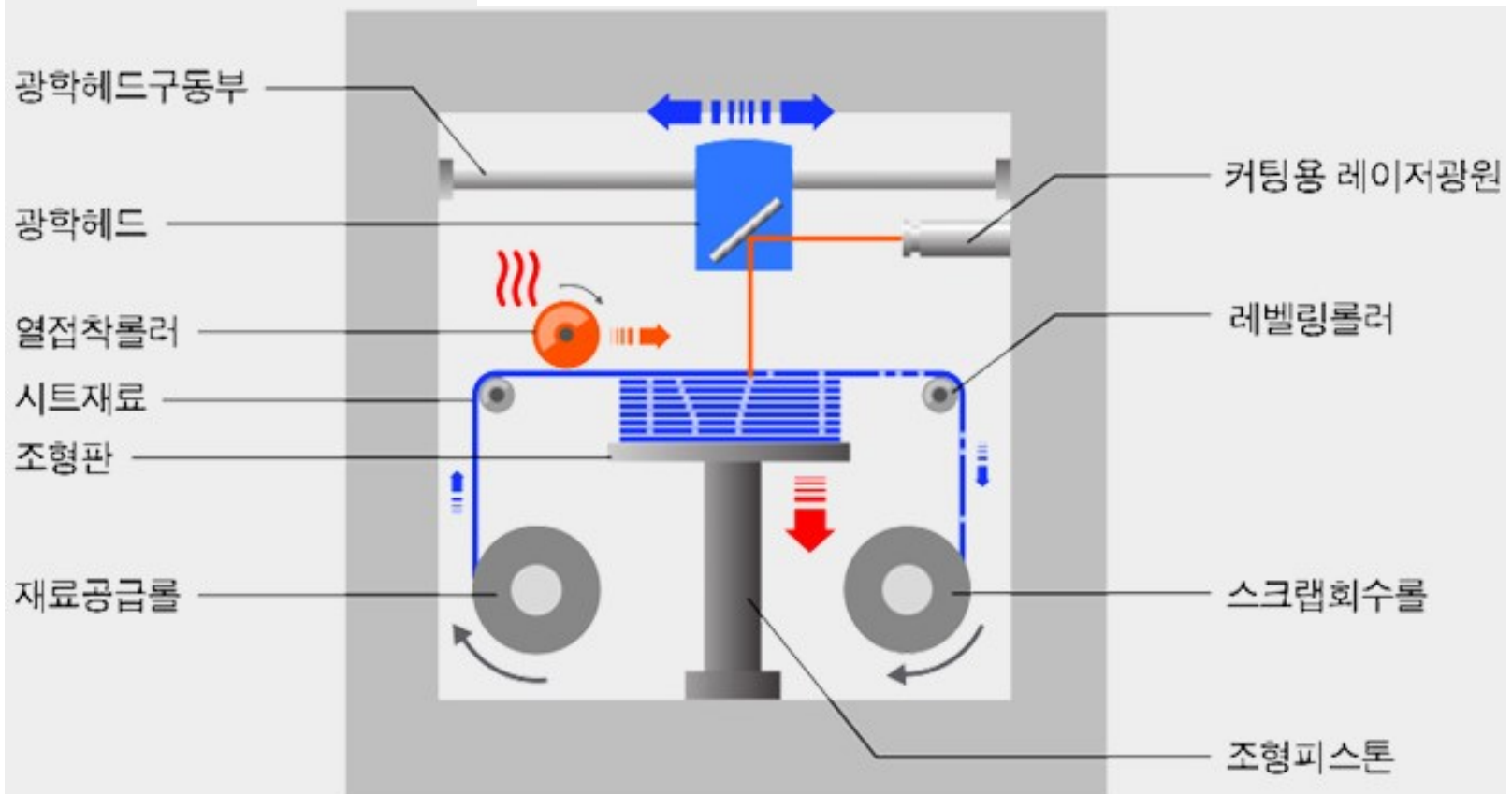


# 분사 방법





## Sheet Laminating LOM





## Direct Energy Deposition DED



분말소재 공급함

Powder Material Cartridge

다축구동시스템

광원

Laser Beam

분말소재와 가스

용융접합부

적층조형부

모재

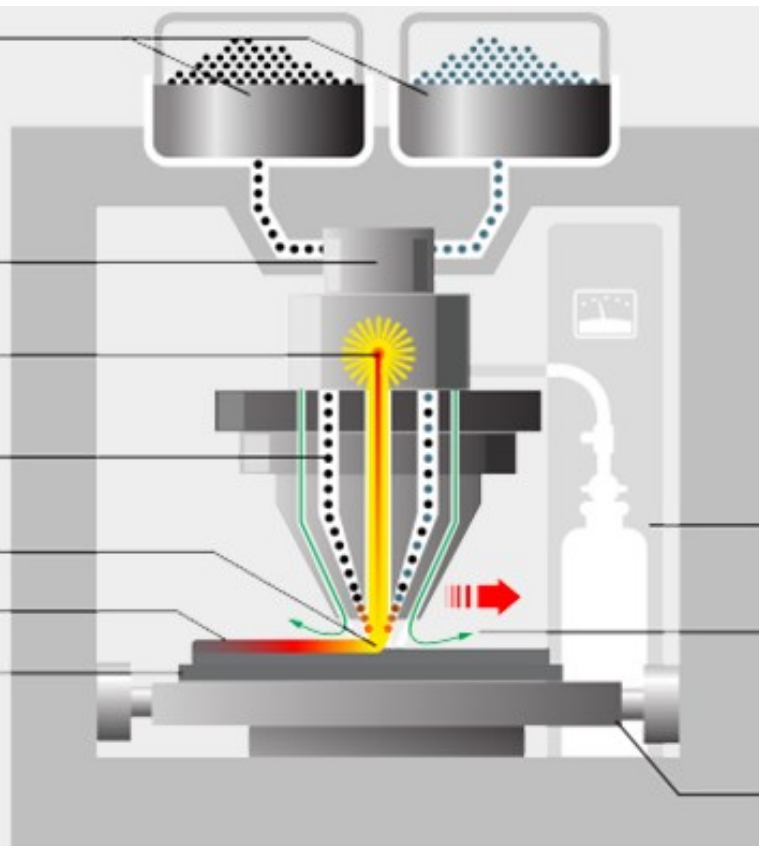
가스/압력제어장치

차폐가스

Shielding Gas

형상제어 베드

Motion Controlled Bed





# Process Categories of Additive Manufacturing

Process Category	Definition (ISO/ASTM 52900): “An additive manufacturing process in which ...”	Technology
Material extrusion	... material is selectively dispensed through a nozzle or orifice	<a href="#">FDM (Fused Deposition Modeling)</a>
Powder-bed fusion	... thermal energy selectively fuses regions of a powder bed	<a href="#">SLS (Selective Laser Sintering)</a> <a href="#">SLM (Selective Laser Melting)</a> <a href="#">DMLS (Direct Metal Laser Sintering)</a> <a href="#">EBM (Electron Beam Melting)</a>
Vat photopolymerization	... liquid photopolymer in a vat is selectively cured by light activated polymerization	<a href="#">SLA (Stereolithography)</a> <a href="#">DLS (Digital Light Synthesis)</a>
Material jetting	... droplets of build material are selectively deposited	<a href="#">PolyJet</a>
Binder jetting	... a liquid bonding agent is selectively deposited to join powder materials	<a href="#">Binder 3DP</a>
Sheet lamination	... sheets of material are bonded to form a part	<a href="#">LOM (Laminated Object Manufacturing)</a>
Directed energy deposition	... focused thermal energy is used to fuse materials by melting as they are being deposited	<a href="#">LENS (Laser Engineered Net Shaping)</a> <a href="#">LMD (Laser Metal Deposition)</a>

# Classification of Additive Manufacturing Processes by ASTM International

CATEGORIES	TECHNOLOGIES	PRINTED "INK"	POWER SOURCE	STRENGTHS / DOWNSIDES
Material Extrusion	Fused Deposition Modeling (FDM)	Thermoplastics, Ceramic slurries, Metal pastes	Thermal Energy	<ul style="list-style-type: none"><li>• Inexpensive extrusion machine</li><li>• Multi-material printing</li><li>• Limited part resolution</li><li>• Poor surface finish</li></ul>
	Contour Crafting			
Powder Bed Fusion	Selective Laser Sintering (SLS)	Polyamides /Polymer	High-powered Laser Beam	<ul style="list-style-type: none"><li>• High Accuracy and Details</li><li>• Fully dense parts</li><li>• High specific strength &amp; stiffness</li><li>• Powder handling &amp; recycling</li><li>• Support and anchor structure</li><li>• Fully dense parts</li><li>• High specific strength and stiffness</li></ul>
	Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	Atomized metal powder (17-4 PH stainless steel, cobalt chromium, titanium Ti6Al-4V), ceramic powder		
	Selective Laser Melting (SLM)			
	Electron Beam Melting (EBM)		Electron Beam	
Vat Photopolymerization	Stereolithography (SLA)	Photopolymer, Ceramics (alumina, zirconia, PZT)	Ultraviolet Laser	<ul style="list-style-type: none"><li>• High building speed</li><li>• Good part resolution</li><li>• Overcuring, scanned line shape</li><li>• High cost for supplies and materials</li></ul>
Material Jetting	Polyjet / Inkjet Printing	Photopolymer, Wax	Thermal Energy / Photocuring	<ul style="list-style-type: none"><li>• Multi-material printing</li><li>• High surface finish</li><li>• Low-strength material</li></ul>
Binder Jetting	Indirect Inkjet Printing (Binder 3DP)	Polymer Powder (Plaster, Resin ), Ceramic powder, Metal powder	Thermal Energy	<ul style="list-style-type: none"><li>• Full-color objects printing</li><li>• Require infiltration during post-processing</li><li>• Wide material selection</li><li>• High porosities on finished parts</li></ul>
Sheet Lamination	Laminated Object Manufacturing (LOM)	Plastic Film, Metallic Sheet, Ceramic Tape	Laser Beam	<ul style="list-style-type: none"><li>• High surface finish</li><li>• Low material, machine, process cost</li><li>• Decubing issues</li></ul>
Directed Energy Deposition	Laser Engineered Net Shaping (LENS) Electronic Beam Welding (EBW)	Molten metal powder	Laser Beam	<ul style="list-style-type: none"><li>• Repair of damaged / worn parts</li><li>• Functionally graded material printing</li><li>• Require post-processing machine</li></ul>



# AM Technologies / Base Materials (1)

Technology	AM process	Typical materials	Advantages	Disadvantages
<b>Stereolithography</b>	Vat polymerization	Liquid photopolymer, composites	Complex geometries; detailed parts; smooth finish	Post-curing required; requires support structures
<b>Digital light processing</b>	Vat polymerization	Liquid photopolymer	Allows concurrent production; complex shapes and sizes; high precision	Limited product thickness; limited range of materials
<b>Multi-jet modeling (MJM)</b>	Material jetting	Photopolymers, wax	Good accuracy and surface finish; may use multiple materials (also with color); hands-free removal of support material	Range of wax-like materials is limited; relatively slow build process
<b>Fused deposition modeling</b>	Material extrusion	Thermoplastics	Strong parts; complex geometries	Poorer surface finish and slower build times than SLA
<b>Electron beam melting</b>	Powder bed fusion	Titanium powder, cobalt chrome	Speed; less distortion of parts; less material wastage	Needs finishing; difficult to clean the machine; caution required when dealing with X-rays
<b>Selective laser sintering</b>	Powder bed fusion	Paper, plastic, metal, glass, ceramic, composites	Requires no support structures; high heat and chemical resistant; high speed	Accuracy limited to powder particle size; rough surface finish
<b>Selective heat sintering</b>	Powder bed fusion	Thermoplastic powder	Lower cost than SLS; complex geometries; no support structures required; quick turnaround	New technology with limited track record
<b>Direct metal laser sintering</b>	Powder bed fusion	Stainless steel, cobalt chrome, nickel alloy	Dense components; intricate geometries	Needs finishing; not suitable for large parts

# AM Technologies / Base Materials (2)

Technology	AM process	Typical materials	Advantages	Disadvantages
<b>Powder bed and inkjet head printing</b>	Binder jetting	Ceramic powders, metal laminates, acrylic, sand, composites	Full-color models; inexpensive; fast to build	Limited accuracy; poor surface finish
<b>Plaster-based 3D printing</b>	Binder jetting	Bonded plaster, plaster composites	Lower price; enables color printing; high speed; excess powder can be reused	Limited choice of materials; fragile parts
<b>Laminated object manufacturing</b>	Sheet lamination	Paper, plastic, metal laminates, ceramics, composites	Relatively less expensive; no toxic materials; quick to make big parts	Less accurate; non-homogenous parts
<b>Ultrasonic consolidation</b>	Sheet lamination	Metal and metal alloys	Quick to make big parts; faster build speed of newer ultrasonic consolidation systems; generally non-toxic materials	Parts with relatively less accuracy and inconsistent quality compared to other AM processes; need for post-processing
<b>Laser metal deposition</b>	Directed energy deposition	Metals and metal alloys	Multi-material printing capability; ability to build large parts; production flexibility	Relatively higher cost of systems; support structures are required; need for post-processing activities to obtain smooth finish

# Technologies and Materials Matrix

Technology	Polymers	Metals	Ceramics	Composites
Stereolithography	●			●
Digital light processing	●			
Multi-jet modeling (MJM)	●			●
Fused deposition modeling	●			
Electron beam melting		●		
Selective laser sintering	●	●	●	●
Selective heat sintering	●			
Direct metal laser sintering		●		
Powder bed and inkjet head printing <sup>13</sup>	●	●	●	●
Plaster-based 3D printing			●	●
Laminated object manufacturing <sup>14</sup>	●	●	●	●
Ultrasonic consolidation		●		
Laser metal deposition		●		●

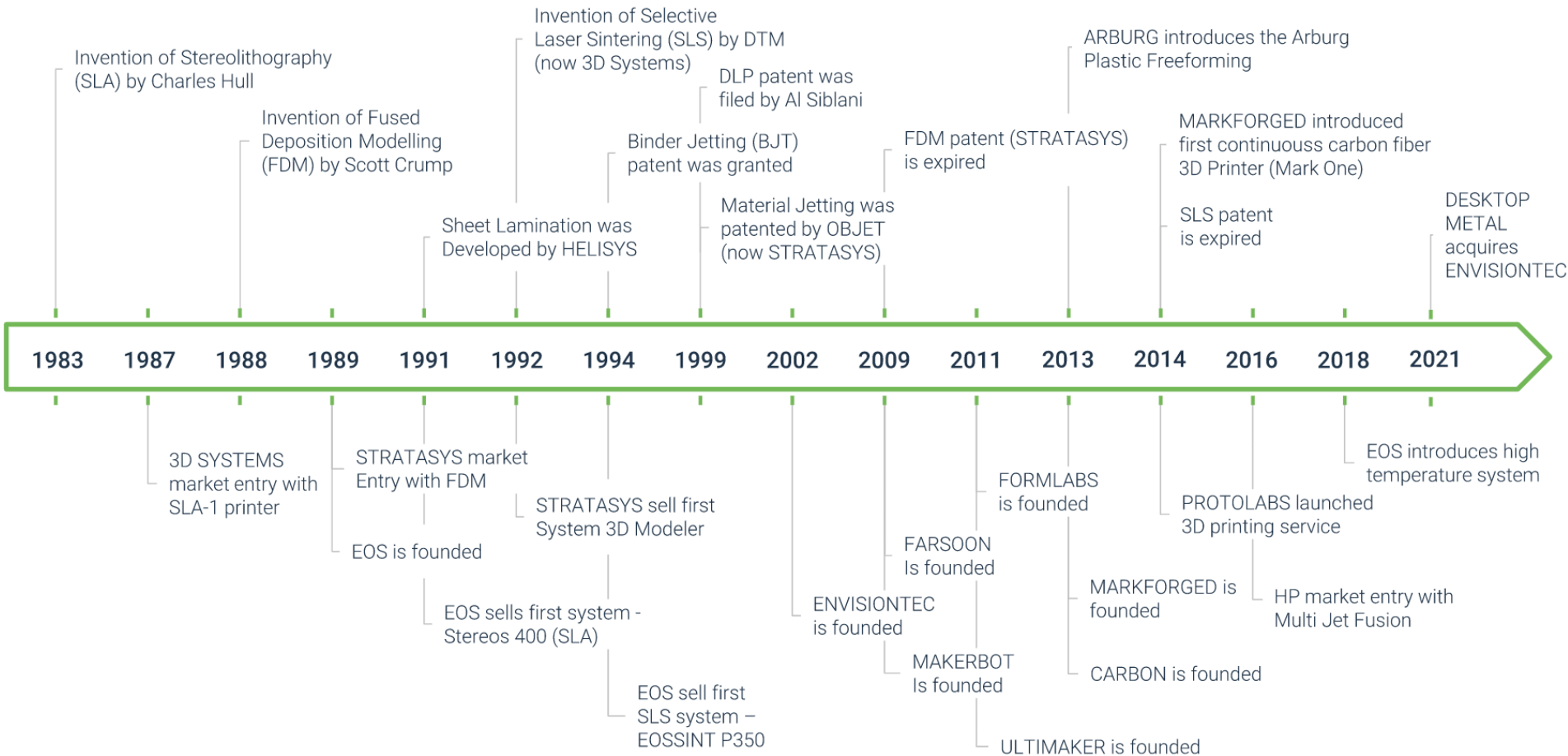
# Summary (2018)

	3D Printer	Process	Material	Adv/Disadv	Companies
Material Extrusion	Fused Deposition Modelling (FDM) / Fused Filament Fabrication (FFF) Contour Crafting (CC)	<i>The material in filament form is extruded through a nozzle at temperature and deposited onto a heated build plate, and then deposited layer by layer.</i> <i>CC: Using high pressure and large nozzles, materials can be extruded for large structures.</i>	Thermoplastic Filaments typically ABS, Nylon, PLA, PC, Composites, Nano-fillers. CC: Concrete, soil,	Adv: Low cost, simplicity, Low maintenance, CC: Large construction Disadv: Voids, difficult to print complex structures, Accuracy is low.	FDM: Stratasys, Ultimaker, Makerbot, Zortrax, BEEVERYCREATIVE, Markforged CC: Contour Crafting Corporation
Vat Photopolymerization	Stereolithography (SLA) Digital Light Processing (DLP)	<i>A platform moves downwards after each layer of liquid resin is cured. SLA- cured with a laser. DLP- cured with a projector,</i>	Liquid Photopolymers (acrylic or epoxy based)	Adv: High accuracy- microns, Disadv: Limited materials to use. Relatively Expensive, Requires significant support structures	SLA – 3D Systems, Formlabs, DWS Systems DLP- EnvisionTEC, B9Creations
Sheet Lamination	Laminated Object Manufacturing (LOM)	<i>Continuous layers in sheet form are cut using a mechanical cutter or laser and then bonded together.</i>	Polymer composites, ceramics, paper, metal-filled tapes.	Adv: High Speed, Low Cost Disadv: Depending on the material post processing might be needed, limited material use	EnvisionTEC, Mcor Technologies,
	Ultrasonic additive manufacturing (UAM)	<i>A rotating Sonotrode applies ultrasonic vibrations to a foil, creating a roughening friction between the foil and to the material being welded. This displaces the surface oxides and other contaminates, under a compressive force the materials are then bonded. A CNC stage allows for selective removal and machining to final dimension</i>	Metals - aluminium, copper, electronics, polymers and other materials can be embedded	Adv: Low temperature processing, allows electronics, sensors and polymers to be embedded Disadv: Early stages of development. More research needed into Titanium, stainless steel.	Fabrisonic
Material Jetting	InkJet Printing (IP) Material Jetting (MJ) Drop on Demand (DOD) NanoParticle Jetting (NPJ)	<i>MJ – cured with UV light. DOD: milled to form, NPJ: Cured with heat, Material is supplied through a nozzle and deposited in the form of droplets onto a build plate. This solidifies, and continuous layers are printed.</i>	ceramics, metals, polymers	Adv: Fast and efficient, produces complex structures. Precision Disadv: High Maintenance	DOD: Solidscape MJ: 3D Systems, Stratasys NPJ: XJET
Binder Jetting	Binder Jetting (BJ)	<i>Powder base and liquid binder are used. The powder is spread evenly and the binder glues to the desired shape.</i>	Gypsum, sand, metal, ceramic, polymers	Adv: Fast, simple and relatively cheap Disadv: Powder form only, mechanical properties relatively weak.	ExOne, 3D Systems
Metals: Powder Bed Fusion (PBF)	Selective Laser Melting (SLM), Selective Laser Sintering (SLS), Selective Heat Sintering, (SHS), Electron Beam Melting (EBM), Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	<i>The laser melts a powder bed, after each layer the powder is spread uniformly by a wiper and the process repeats. The Z-axis is lowered after each print. EBM requires the use of a vacuum.</i>	SHS: Nylon, DMLS, SLS, SLM: Stainless steel, Titanium, Aluminium, Cobalt Chrome, Steel SLS -Plastic EBM: Titanium, Cobalt Chrome, Stainless Steel, Aluminium, Copper.	Adv: No support structure needed, the integrated powder provides this. Large range of material options Disadv: High power usage, Size limitations, Powder grain size very important, effects surface finish.	SLM / DMLS: SLM Solution, Renishaw, Concept-laser, SLS: 3D Systems, Sintratec, Sinterit, EOS P Systems, EBM: Arcam
Direct Energy Deposition (DED)	Laser Engineered Net Shaping (LENS), Directed Light Fabrication (DLF), Direct Metal Deposition (DMD), 3D Laser Cladding,	<i>A nozzle combined with a multi-axis arm deposits melted material onto a specified surface. The nozzle can move in multiple directions and is not fixed to a specific axis. Upon deposition the material is melted via a laser or electron beam.</i>	Metals: Cobalt Chrome, Titanium, Polymers and Ceramics possible.	Adv: Used for repair work of structures, Multiple axis, flexibility, Disadv: Limited material use, Post processing may be needed.	LENS: Optomec

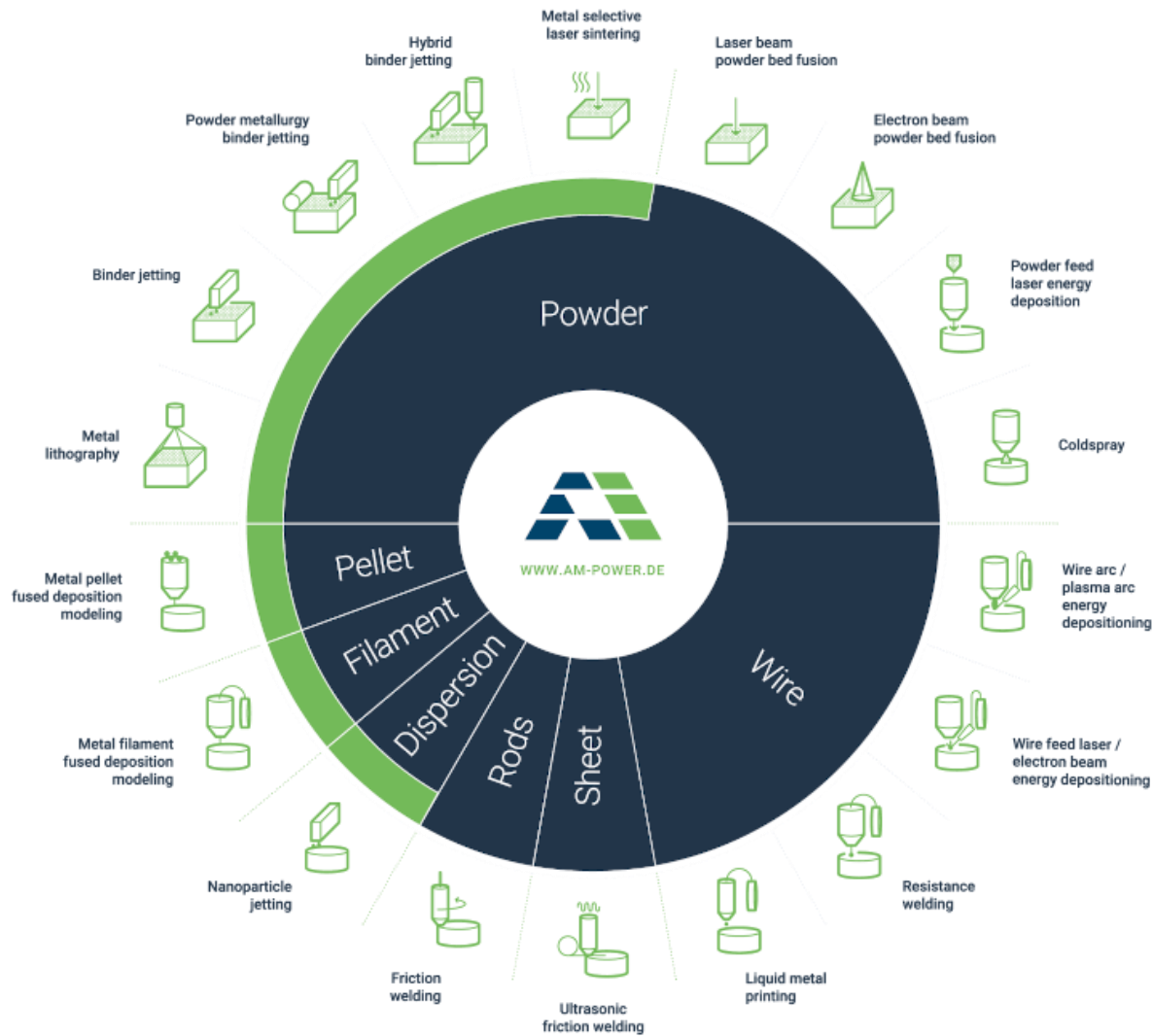
# Polymer Additive Manufacturing



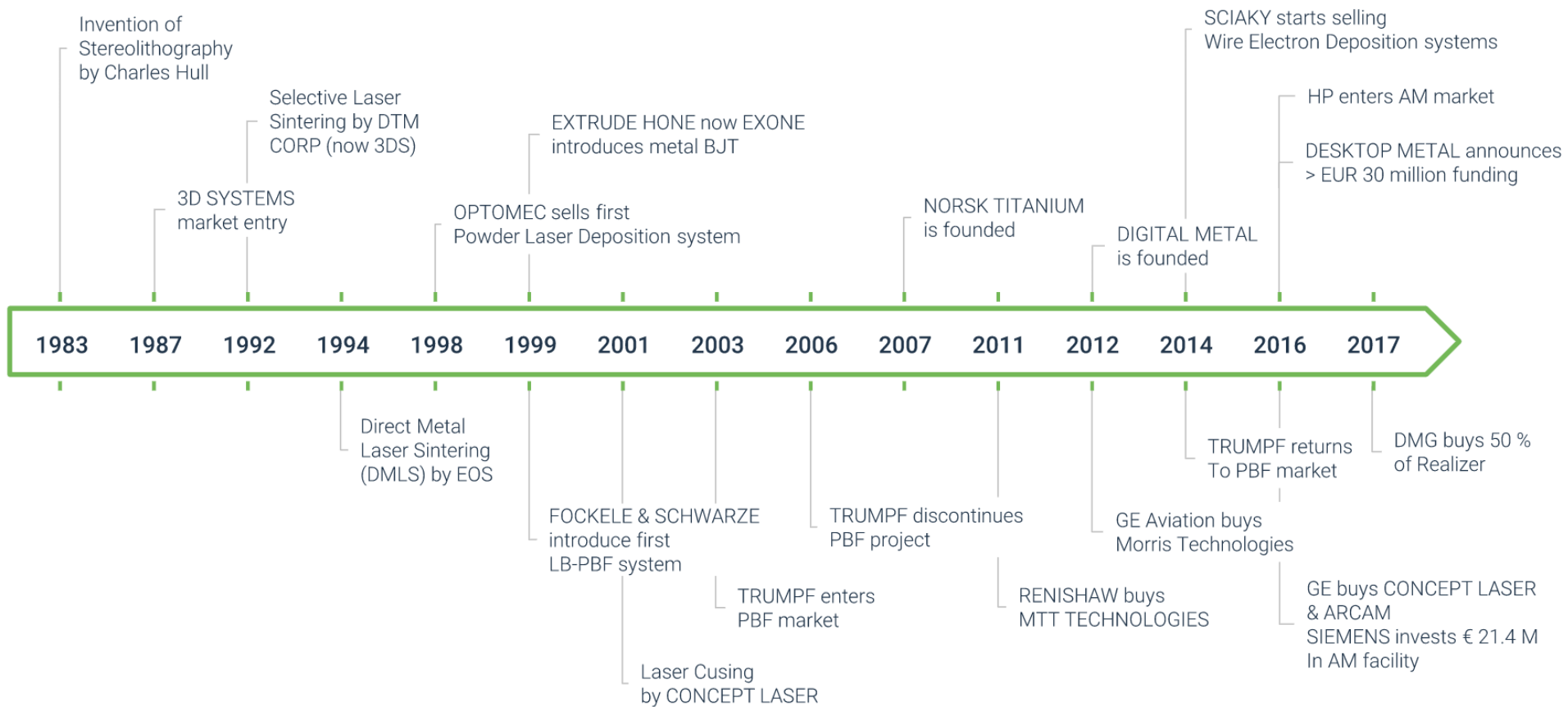
# Polymer Additive Manufacturing: History



# Metal Additive Manufacturing



# Metal Additive Manufacturing: History





# AM vs. Traditional Manufacturing

---

- Advantages of AM
  - Lighter, more complex designs
  - Speed to market
  - Waste reduction
- Advantages of traditional manufacturing (dies, molds, milling, machining)
  - Mass production
  - Choice of materials
  - Manufacturing large parts
- Two key areas of benefit
  - Workflow streamlining
  - Flexible design and product customization

# 3D 프린팅의 장점

- 시제품 제작 비용 및 시간 절감
- 다품종 소량생산, 손쉬운 맞춤형 제작
- 복잡한 형상제작 및 재료비 절감
- 제조공정 간소화, 인력이 많이 소요되지 않아 인건비, 조립비용 절감
- 기존 절삭방식에서는 불가능한 중공형상 및 복잡한 내부형상 가능
- 부품제조가 아니라 일체화된 어셈블리된 형상을 한번에 조형
- 복수의 상이한 재료를 사용한 일체조형 가능
- 누가 몇 개를 만들더라도 매회 동일한 제품 조형 가능
- 복수의 모델을 한번에 조형 가능
- 생산자의 기술력에 크게 의존하지 않음

# 3D 프린팅의 단점

- 조형속도가 느리고 규모가 큰 물체 조형에 한계
- 표면해상도가 아직 높지 않음
- 적층방식제조로 단층방향의 힘에 약하고 강도가 약함
- 광경화성수지, 레이저소결수지, ABS필라멘트 및 금속소재 일부만 활용 가능
- High-end 산업용 장비재료는 kg당 수백 달러, Low-end 개인용장비는 kg당 수십달러에 달하는 등 재료비가 고가
- 높은 디자인 해상도로 인하여 상당한 컴퓨팅 능력 요구
- 소멸된 특허권 등이 있긴 하나 성격상 특허의 경계가 모호하고 이로 인한 지적재산권 분쟁의 소지
- 소재와 공정에 대한 규격이나 표준이 정립되어 있지 않음

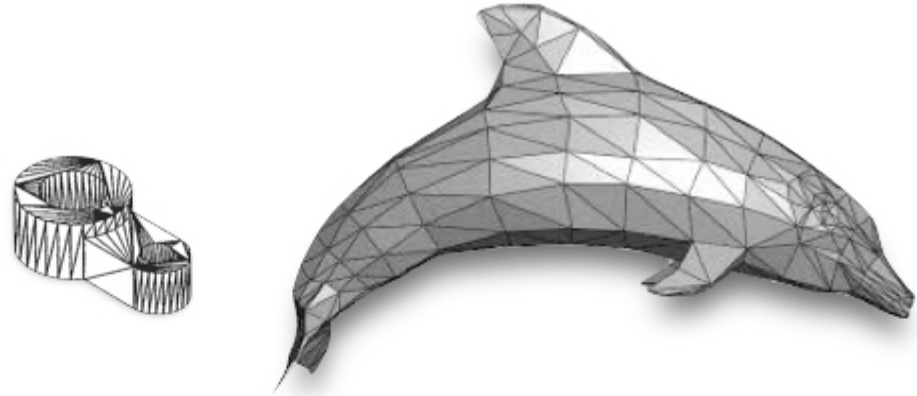
# File Formats

- STL (Standard Tessellation Language)
  - 3D Systems 에서 개발, ASCII와 BINARY로 표현
  - 컬러 값을 가지고 있지 않는 3차원 지오메트리 형상을 표현
- WRL (VRML 파일, 보통 "월드(world)"라 부름)
  - 3D 폴리곤의 버텍스와 에지 및 표면 색깔, 텍스처 UV 매핑, 반사 및 투명 효과 등을 표현
- PLY (주로 3D 스캐너로부터 3 차원 데이터를 저장)
  - 평면 다각형의 리스트와 같은 단일 객체의 비교적 간단한 설명을 지원
- AMF (Additive Manufacturing File)
  - XML 기반의 데이터 교환용 오픈 소스 프레임 워크
  - 기능별로 등급을 나눈 디지털 재료를 포함한 복합재료, 다채로운 색상, 복잡한 구조를 표현

# STL

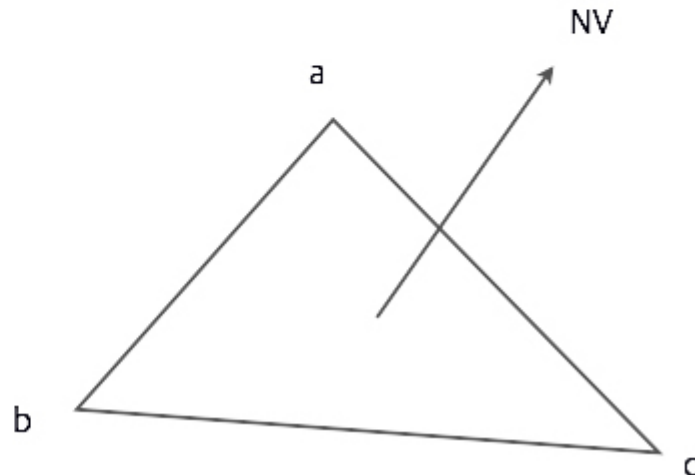
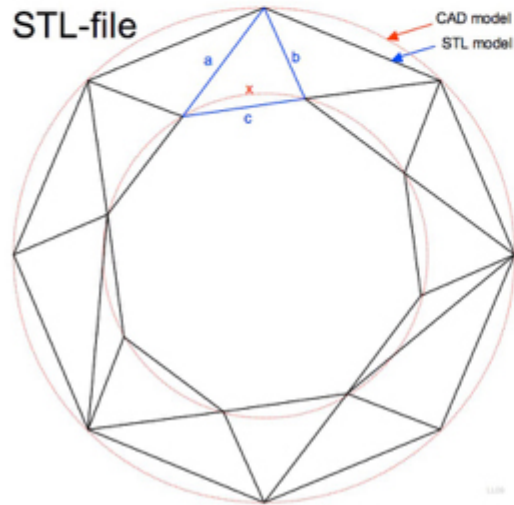
## STL파일의 정의

Surface Tessellation Language  
Stereo-Lithography  
Standard Transform Language



STL(stereo lithography) 파일 형식은 미국 3D Systems사가 1988년 제정한 인터페이스 표준 데이터 형식이 간단하며 복잡한 CAD 시스템의 지원과 양호한 크로스플랫폼이 필요치 않아, 여러 분야에서 광범위하게 응용. 거의 모든 CAD 시스템에서 설계한 3D모델을 STL 형식으로 변환가능.

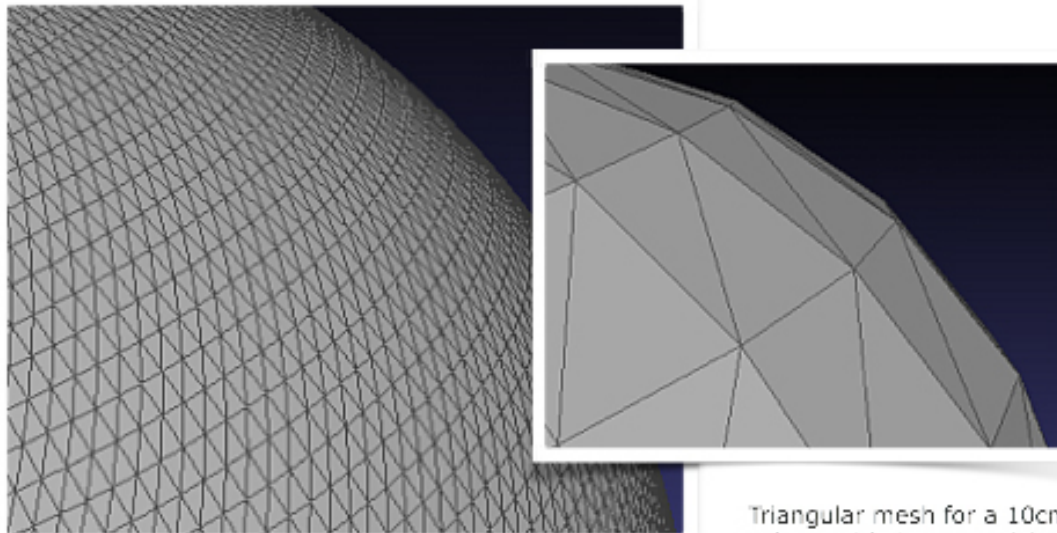
STL-file



# STL vs. AMF

STL 형식은 유한 원소의 그리드 구분과 유사, 이것은 물체 표면을 삼각형으로 구분하여, 삼각형 패치로 3D실물의 표면을 구성하여 유사하게 구현. 삼각형 꼭지점 좌표와 삼각형의 노멀 벡터의 묘사를 통해 3D 모형의 기하 특징을 표시  
STL 파일은 이진법 형식과 ASCII 코드 형식 STL 파일이 폭 넓게 응용되고 있으나 파일 형식의 결함으로 데이터가 너무 많고, 토폴로지 정보 부족, 많은 데이터 량, 데이터 에러 등의 문제있음.

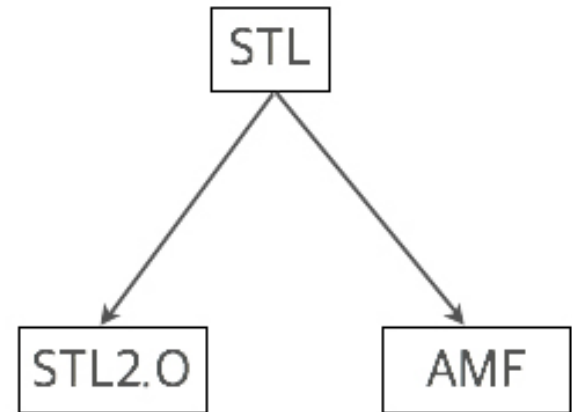
STL files inefficient for High Resolution 3D printers



Triangular mesh for a 10cm sphere with 10 micron precision  
50,000 triangles / 350,000 lines / 13MB

Triangular mesh for a 10cm sphere with 1mm precision  
506 triangles / 0.13MB

STL files contains only vertex and facet definitions,



	STL Format (Binary)	AMF Format (Curved Triangles)
<b>PRECISION</b>	10 micron	10 micron
<b>NO. OF MESH TRIANGLES</b>	49,500	320
<b>FILE SIZE</b>	2400k	10k

# AM Applications by Sector

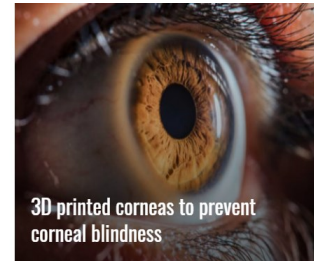
## Medical



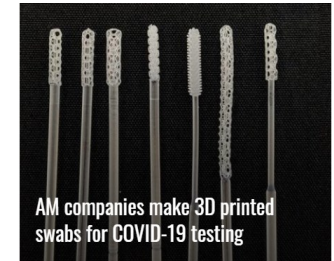
8 Very Promising Bioprinting Projects



3D printing bone, a way to treat fractures?



3D printed corneas to prevent corneal blindness



AM companies make 3D printed swabs for COVID-19 testing

## Transport



3D printing accelerates supercar design and production



3D printed rocket from Relativity will launch satellite into space



AREVO creates the first 3D printed carbon fiber unibody bike frame



BMW incorporates 3D printed parts onto their new motorcycle

## Architecture



#3DStartup: Apis Cor, Creators of the 3D Printed House



3D Printed Architecture: Top 12 Most Stunning Buildings



3D printed art installation installed at the iLight Marina Bay Festival in Singapore



3D printed floating house to be built in the Czech Republic

## Art & Design



#3DStartup: Yuyo and their 3D printed surfboards



3D chocolates with exotic shapes and flavours



14 Best 3D Printed Furniture Projects



3D Printed Fashion: Top 13 3D Printed Fashion Designs

# Industries and Applications

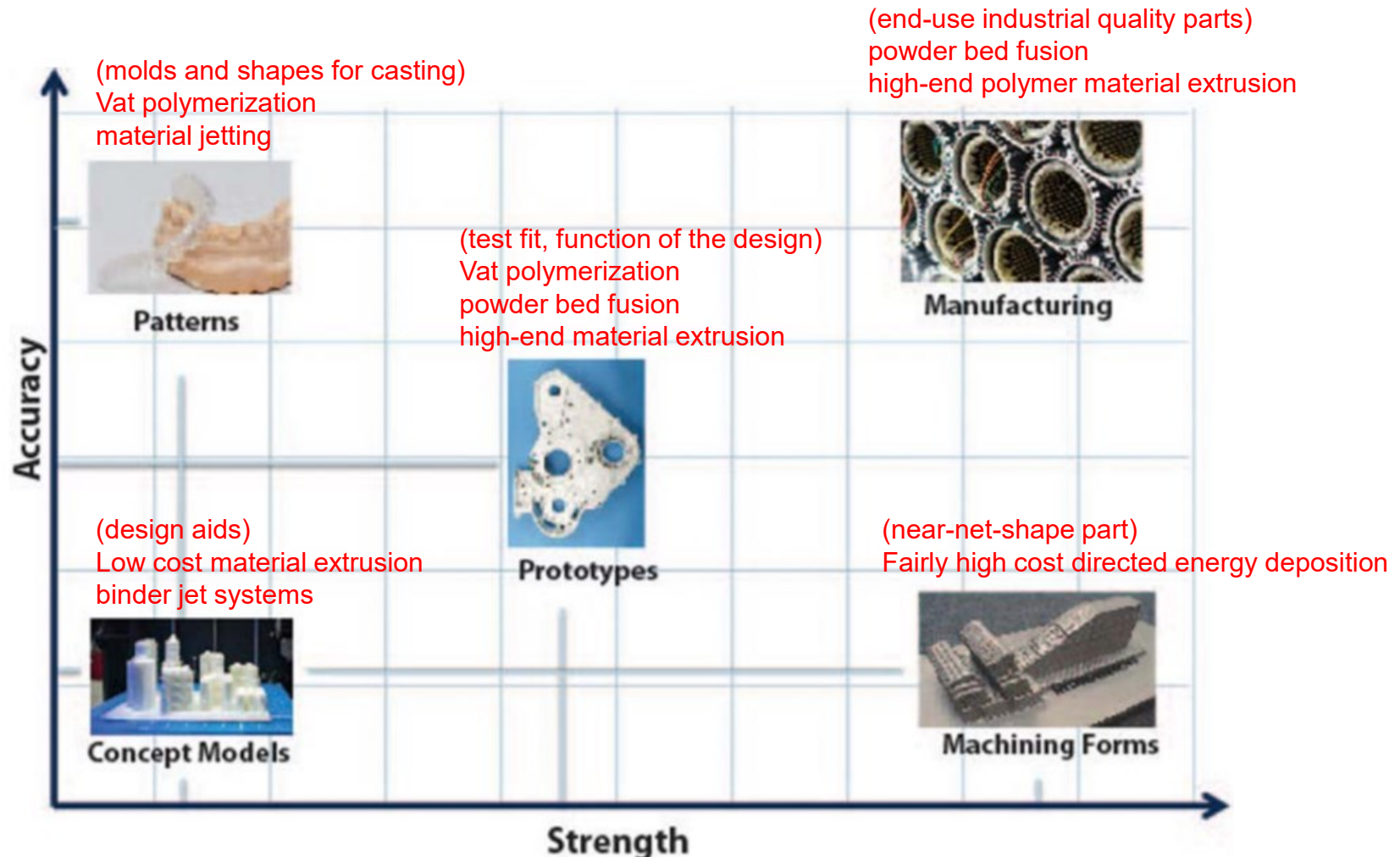
---

- Aerospace: lighter parts
  - Rocket injector (2013, NASA): hot fire test
  - First part for use in a commercial jet engine (2015)
  - Boeing 787 structural parts fabricated from titanium wire (2017)
- Automotive: rapid prototyping
  - Rear wing replacement of Formula 1 race car (McLaren): five weeks → 10 days
- Medical: patient specific
  - Stryker: custom, on-demand surgical implants
- Industrial Manufacturing: product development



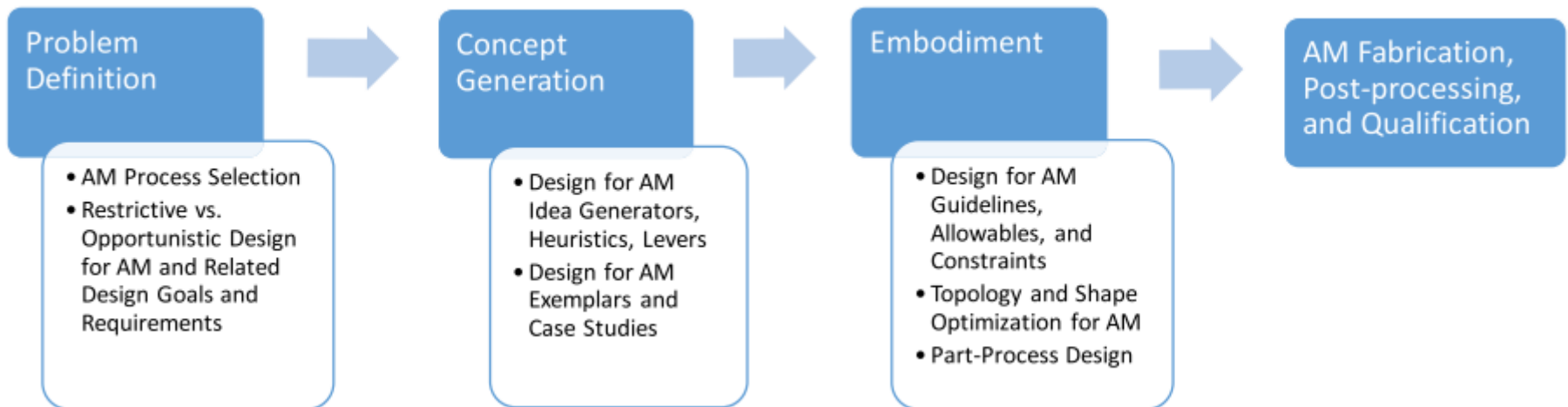
- 
- Formlabs
    - The Industry-Leading Desktop 3D Printer, Powered By Low Force Stereolithography
    - The Industrial Power of Selective Laser Sintering for the Benchtop
  - Carbon
    - The Carbon Digital Light Synthesis™ process
  - Desktop Metal
    - Metal and carbon fiber 3D printing
  - ExOne
    - metal 3D binder jet printing

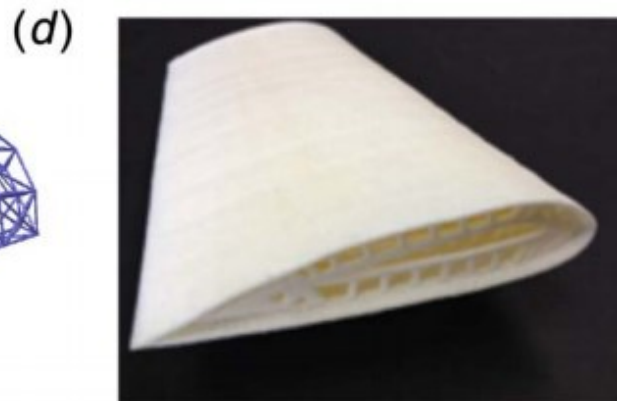
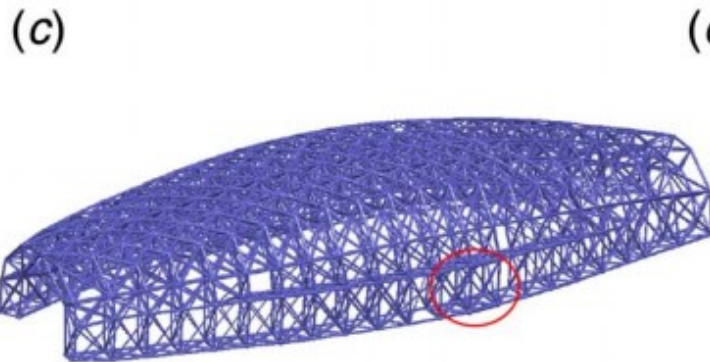
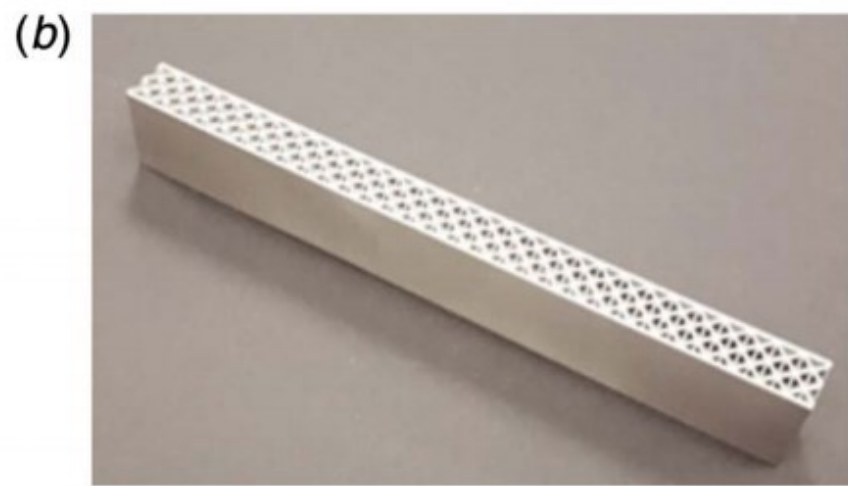
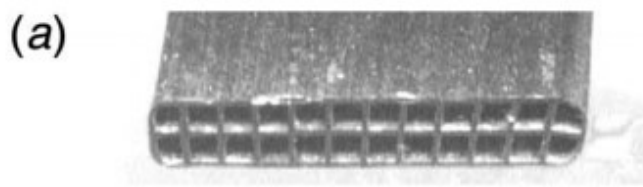
# AM Applications



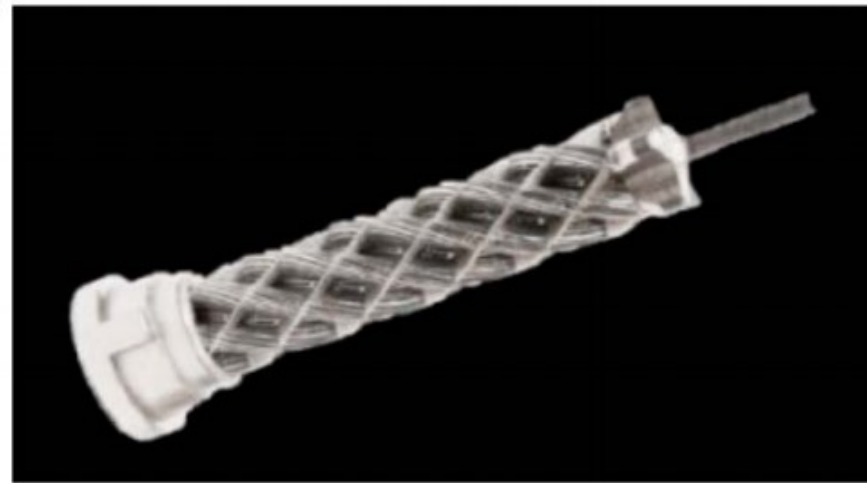
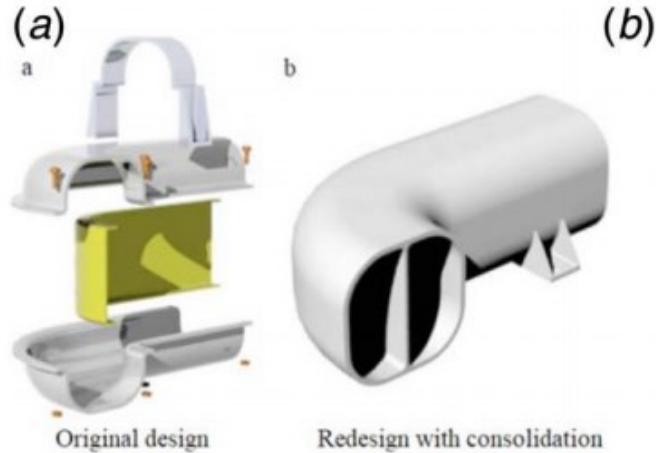
# Design for Additive Manufacturing

- New classes of parts uniquely enabled by AM
  - architected materials
  - multifunctional parts with complex internal geometries
  - fully customized products
- Emerging design methods and computational tools for AM





**Fig. 16** Examples of architected structural materials clockwise from upper left: honeycombs (a) (courtesy of Cochran et al., Georgia Tech [68]), uniform lattice structures (b) (courtesy of Seepersad et al., UT Austin), conformal lattice structures for reinforcement (c) (reprinted by permission from Springer, [69]) and deployment (d) (courtesy of Seepersad et al., UT Austin)



**Fig. 17** Examples of additively manufactured parts with complex architectures: (a) aircraft duct consolidated from many parts into a single, complex part (reprinted by permission from Springer, [79]), (b) additively manufactured screen for a downhole drilling application [80], (c) mathematically inspired artwork (courtesy of Bathsheba Grossman), and (d) a burner with organically shaped flow channels (courtesy of Siemens)



(a)



(b)



(c)



**Fig. 18** Personally customized designs fabricated with AM. Left to right: (a) Invisalign braces (courtesy of Invisalign), (b) custom-fitting prosthetic [82], and (c) aesthetically tailored prosthetic (courtesy of Bespoke, now part of 3D Systems)



**Incorporate Cellular or Lattice Structures** to reduce weight with minimal impact on stiffness and strength. This example is a lightweight, impact absorbing bicycle seat.



**Incorporate Internal Functionality** that might not otherwise be manufacturable but offers additional or multi-functionality for a single part. This example is an insert with conformal cooling channels around the inner channel.



**Combine Parts** to reduce assembly time, cost, and complexity. This example is a piece of ductwork from an aircraft with multiple pieces and fasteners combined into a single component.

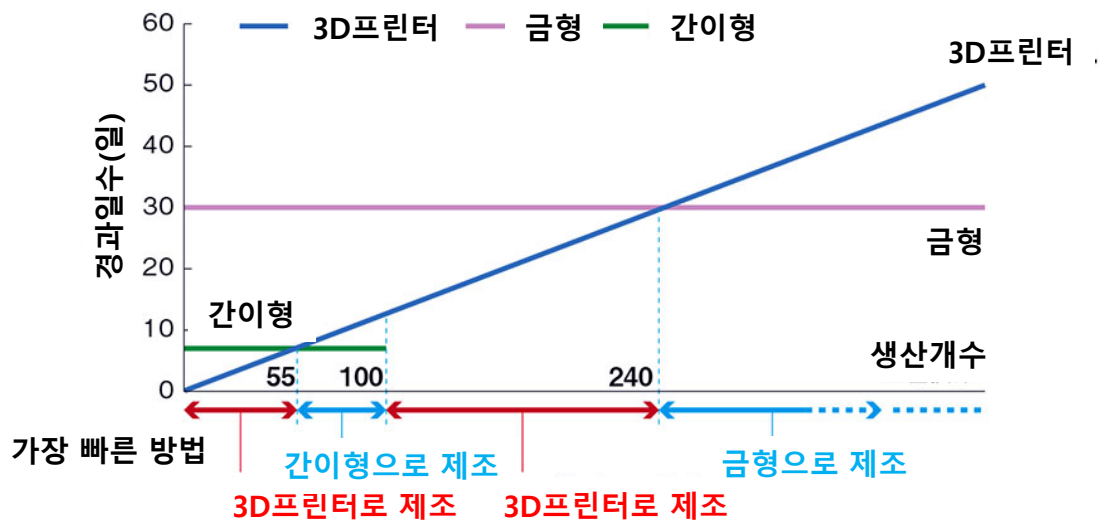


**Create personalized designs** by enabling 3D scanned customized interfaces. This example is a conformed cast for a broken arm.

**Fig. 20 Examples of idea generators [94] and accompanying designs that illustrate them. Photos courtesy of Fast Radius, EOS, Boeing, Cortex Cast.**

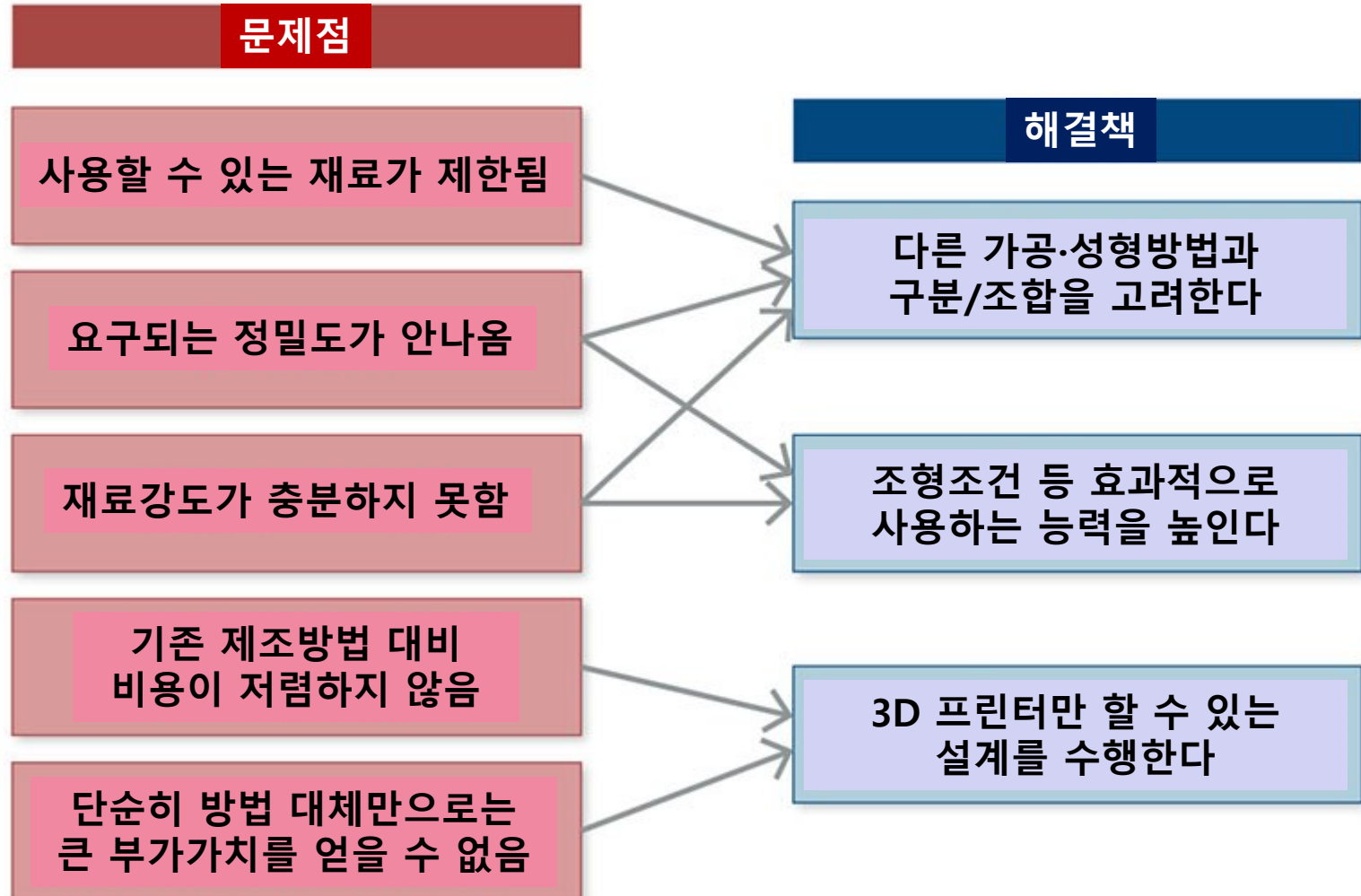
# 3D 프린터의 활용

- 시작품 제작
  - 제품개발 프로세스의 기간단축 및 비용절감
  - 실물을 통한 검토회수 증가로 품질향상
- 최종 제품/부품의 제조수단
  - 납기단축
  - 제품의 커스터마이징화
  - 기타: 재고삭감, 원가저감

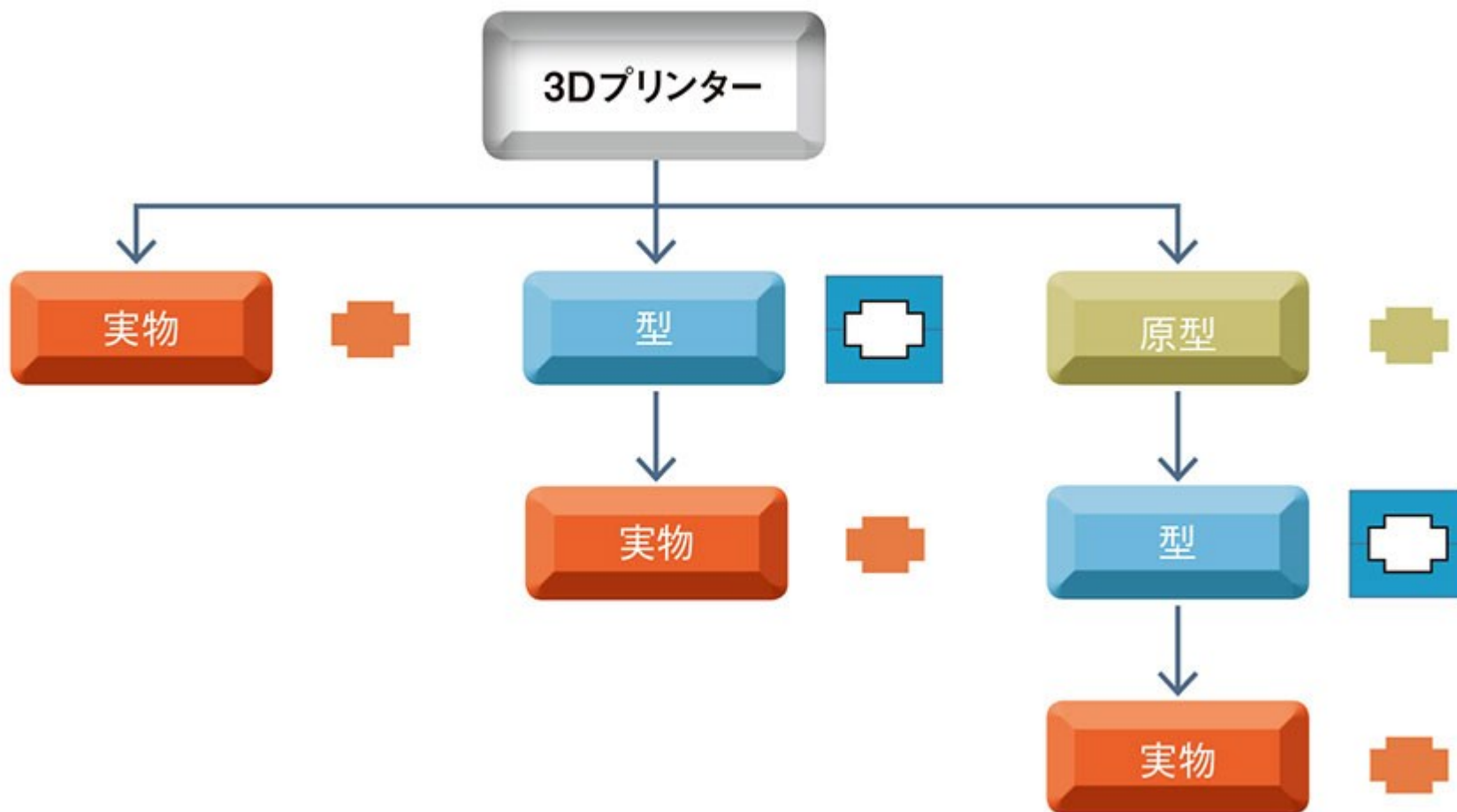




# 3D 프린터를 제조장비로 활용?

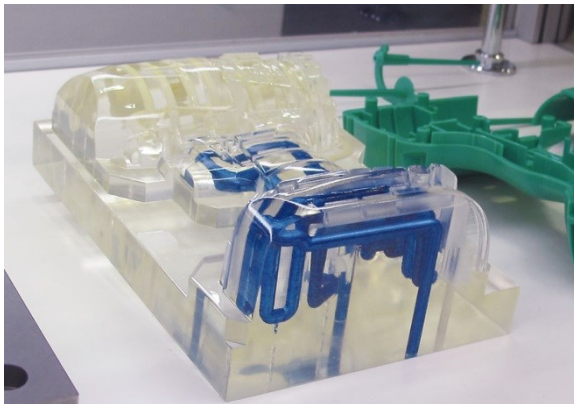


# 1. 3D 프린터로 실제 부품을 제작하는 방법



## 2. 효과적 활용, 3. 3D 프린터만 가능?

- 장비의 기본사양을 상세히 이해
- 카탈로그 사양 이외에 실제 조건과 형상재현성/정밀도 관계를 체득
- 자동화가 많이 되어 있어도 사용자가 개입할 수 있는 파라미터
  - 설치환경 제어(온도 등), 적층방향, 서포트 부착 방법, 서포트 제거를 포함한 후처리
- Data Format
  - STL: 형상 정보이외에 표현 불가능
  - AMF(Additive Manufacturing File Format) 표준화: 장비설정



금형의 냉각수관  
(직선적인 수관의 조합 →  
3차원적 복잡한 경로)

# Mass Customization

- Order made: 고객요구에 대한 개별최적화
- Mass customization: 대량생산과 동등한 가격과 기간에 제공 가능 (제품의 고부가가치화)
  - 사례: 명함집 (이름과 회사명이 하나씩 다름)
  - 조형시간: 약1시간 (조형영역에 여럿 배치하면 더 줄임)
  - 분말수지를 레이저로 용융결합하는 방식
  - 적층두께: 약10mm
  - 힌지부분 일체: 조립불필요



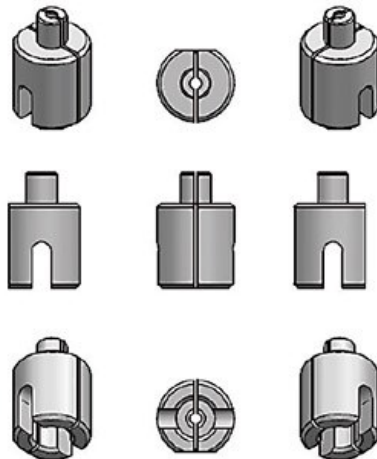
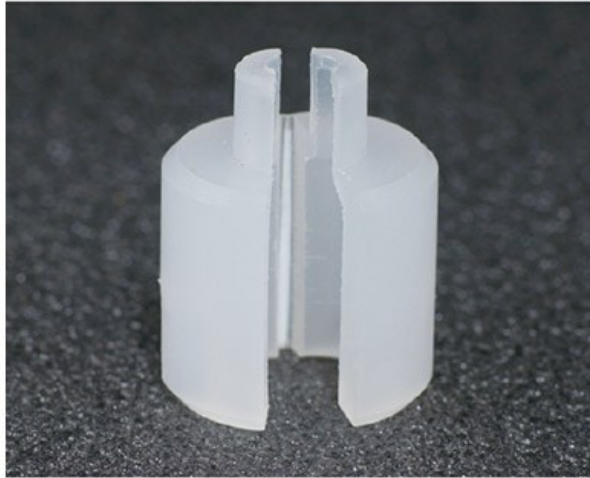
# Precision vs. Cost/Time

	3D Printing	절삭가공	사출성형
정밀도	$\pm 0.1 \sim 0.3\text{mm}$	$\pm 0.01\text{mm}$	$\pm 0.03\text{mm}$
1개당 시간	3.7시간	17시간	25초
1개당 가격(재료비)	20,000Yen	129,000Yen	70Yen
초기(준비) 시간	0	8시간	1~1.5개월
초기(준비) 가격	0	60,800Yen	2,000,000Yen

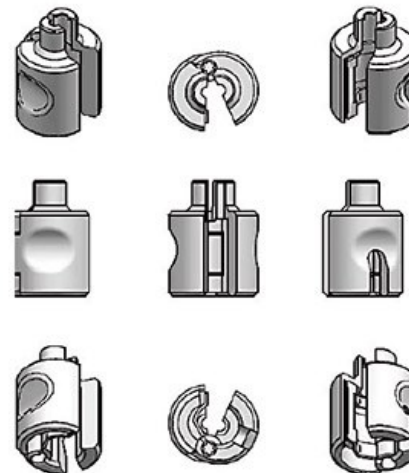
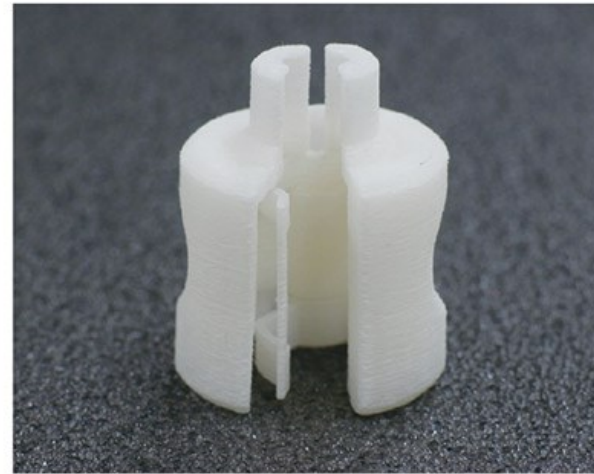
- 절삭가공: 단순한 형상, 고 정밀도 요구
- 3D 프린팅: 복잡한 형상 (내부의 공동을 설계, 복수부품 일체화→소형화, 경량화)

# 제조방법 변경으로 기능 강화

기존제품 (절삭가공/PP)

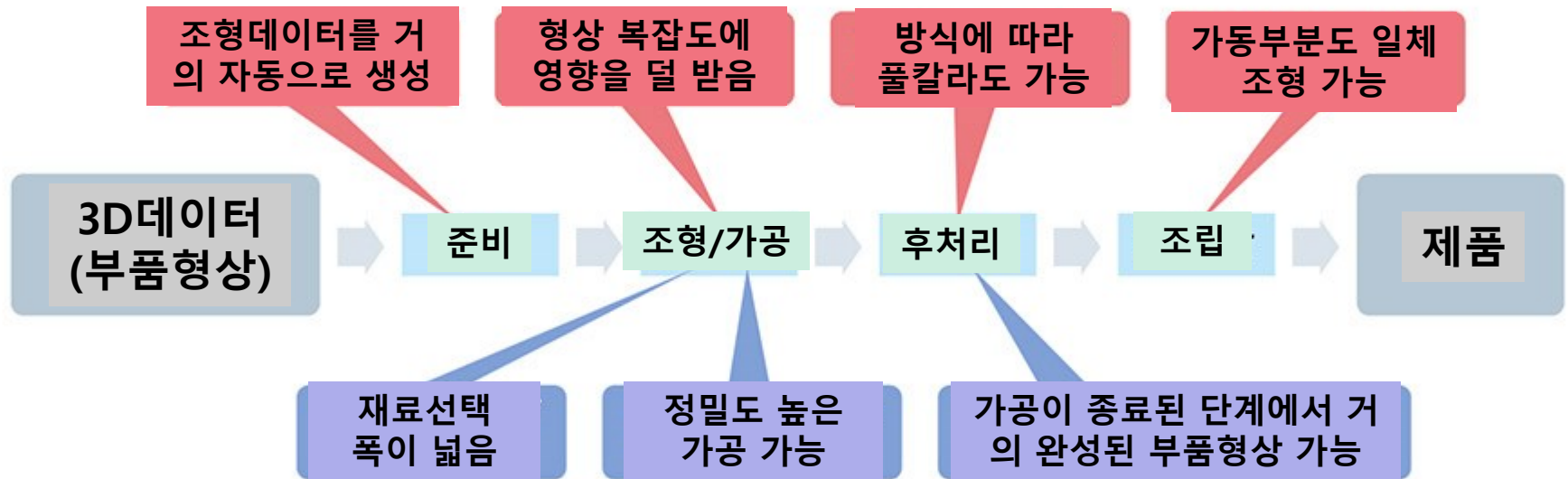


개량제품 (3D프린팅/PA)



# 전체 프로세스로 검토

## 3D 프린팅



## 절삭가공

3D 프린팅	절삭가공
복잡한 형상에 대응하기 쉽다 저렴한 가격으로 단시간에 완성시킬 수 있다	높은 치수정밀도를 실현할 수 있다 사용할 수 있는 재료가 다양하다

# Mass Customization





# Mass Customization: 사례 (1)

- BMW MINI의 내외장부품 커스터마이징 서비스
  - [MINI Yours Customized](#) (2018년 봄에 개시)
- Volkswagen “key case”
  - HP Metal Jet (금속3D프린터)로 제조한 부품 조달 (2019.09)



# Mass Customization: 사례 (2)

- Adidas “Futurecraft 4D” (midsole: 중창)
  - 발크기나 형상뿐 아니라 뒹 때 골격의 움직임 등을 기초로 형상을 최적화
- HOYA vision care “Yuniku” 개발
  - 단지 디자인이나 사이즈를 조정하는 것이 아니라 시력 조정
  - 주문제작 안경제조용 플랫폼



# Mass Customization: 사례 (3)

- 동경대 생산기술연구소: MIAMI프로젝트
  - 스포츠용 의족 연구개발: 육상경기용 의족 “Rami”
  - 인체 맞춤은 물론 경량화 추구, 설계/제조 프로세스 최적화
- Align Technology의 치과교정기구 “Invisalign”
  - 치형 3D스캔, 교정 중 틀을 가열한 폴리우레탄 시트를 덮어 진공성형으로 제작, 전세계 520만명 치료

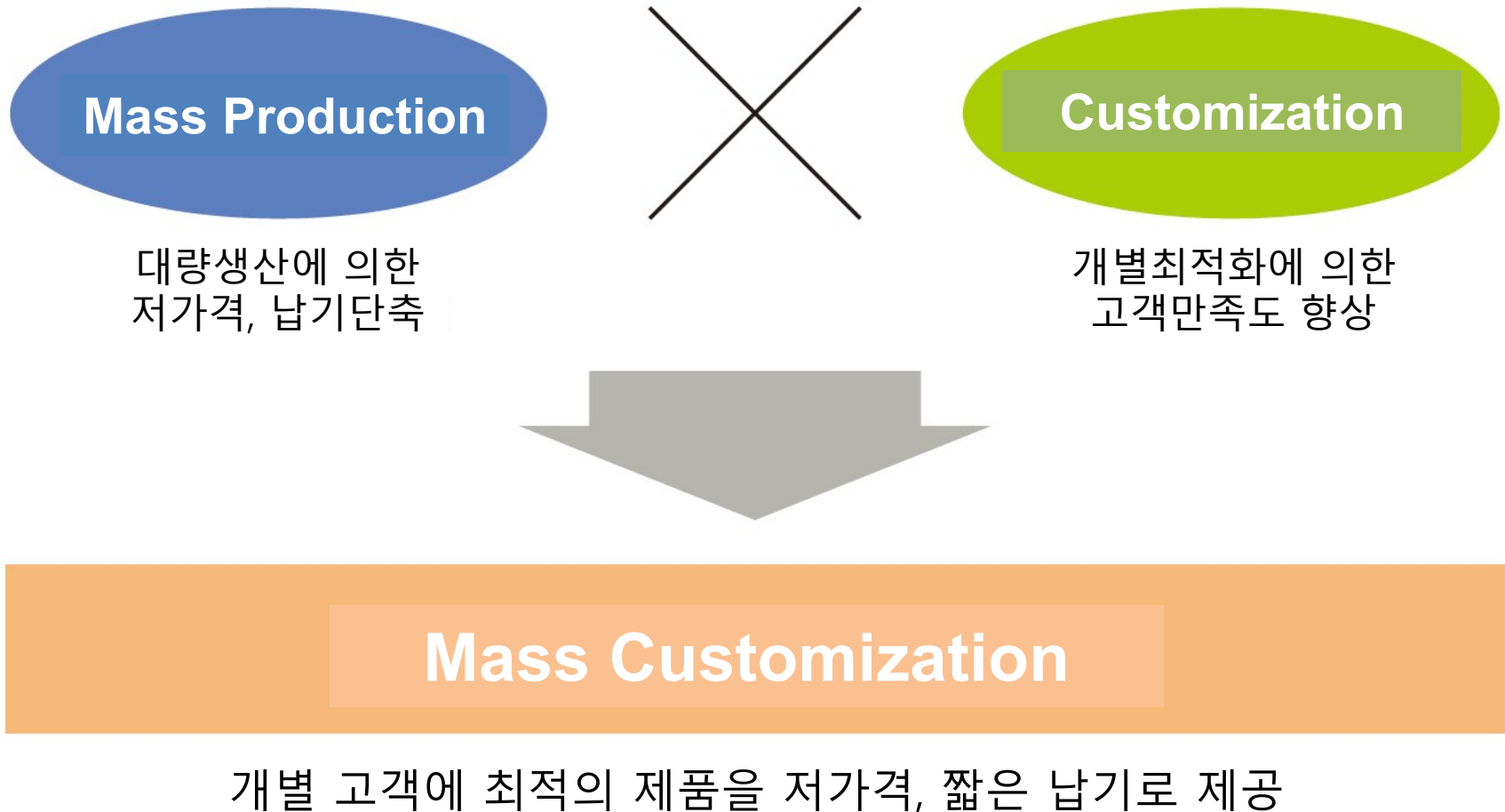


# Mass Customization: 사례 (4)

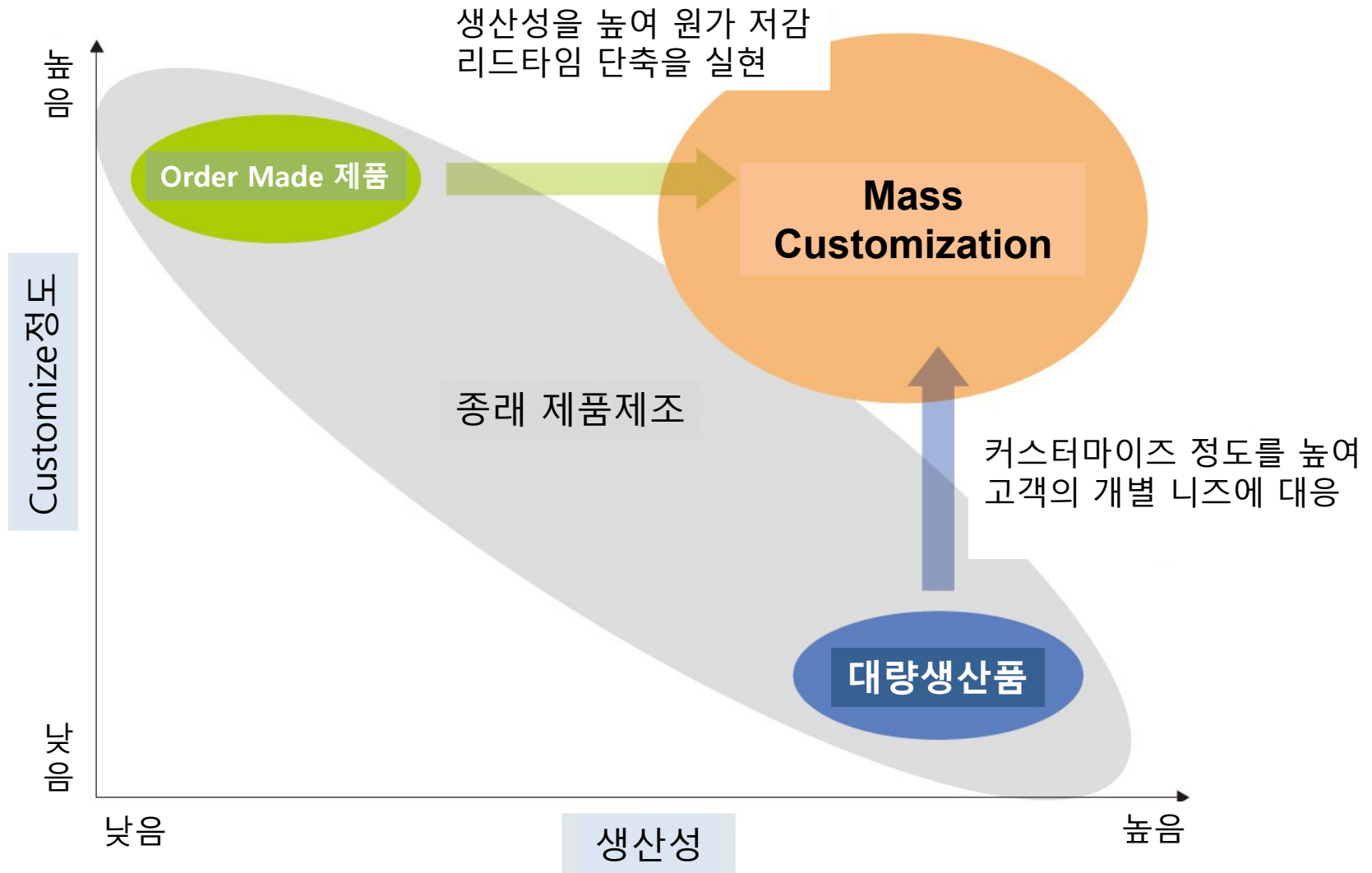
- Gillette “[Razor Maker](#)” 서비스를 시범 개시 (2018.10)
  - 면도기 핸들부분을 커스터마이징
  - 48개 패턴의 기본 디자인 선택하여 색, 면도날 개수 등 변경
- Original “[Original Stitch](#)”
  - 소매, 칼라, 버튼 디자인을 10억 가지 중에서 선택, 사이즈도 유저에 맞춤, 전신사진으로부터 16개 사이즈를 자동으로 추출



# Mass Customization 정의

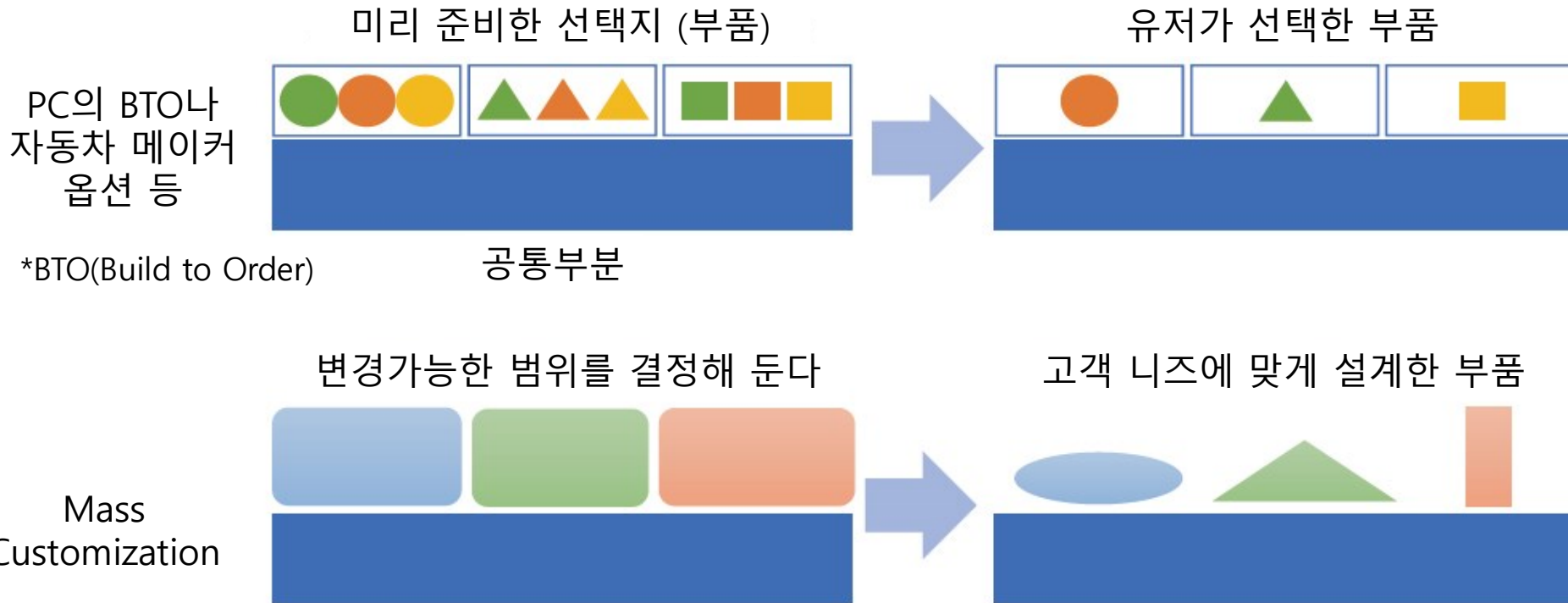


# Mass Customization 접근방법





# Customize 정도 차이



- 고객 요구에 부응하는 커스터마이징(맞춤형)의 폭 확대, 유연성 높임
- 안전성과 품질, 기능·성능면에서의 제약은 있지만, 고객이 자유롭게 변경할 수 있는 요소와 범위를 확대시킴
- 고객이 결정한 세계에 하나밖에 없는 디자인, 개인 체격에 맞는 웨어 등을 적절한 가격에 제공

# Customize 정도 향상에 따른 장점

취미·기호

기능·성능



면도기  
판넬



자동차 내·외장부품



자동차 용품



셔츠



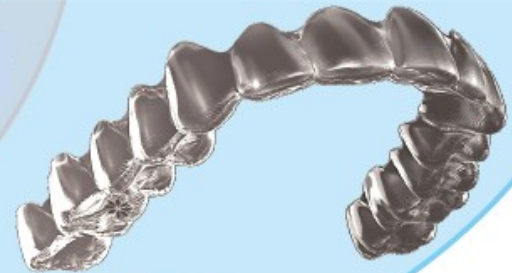
신발



안경



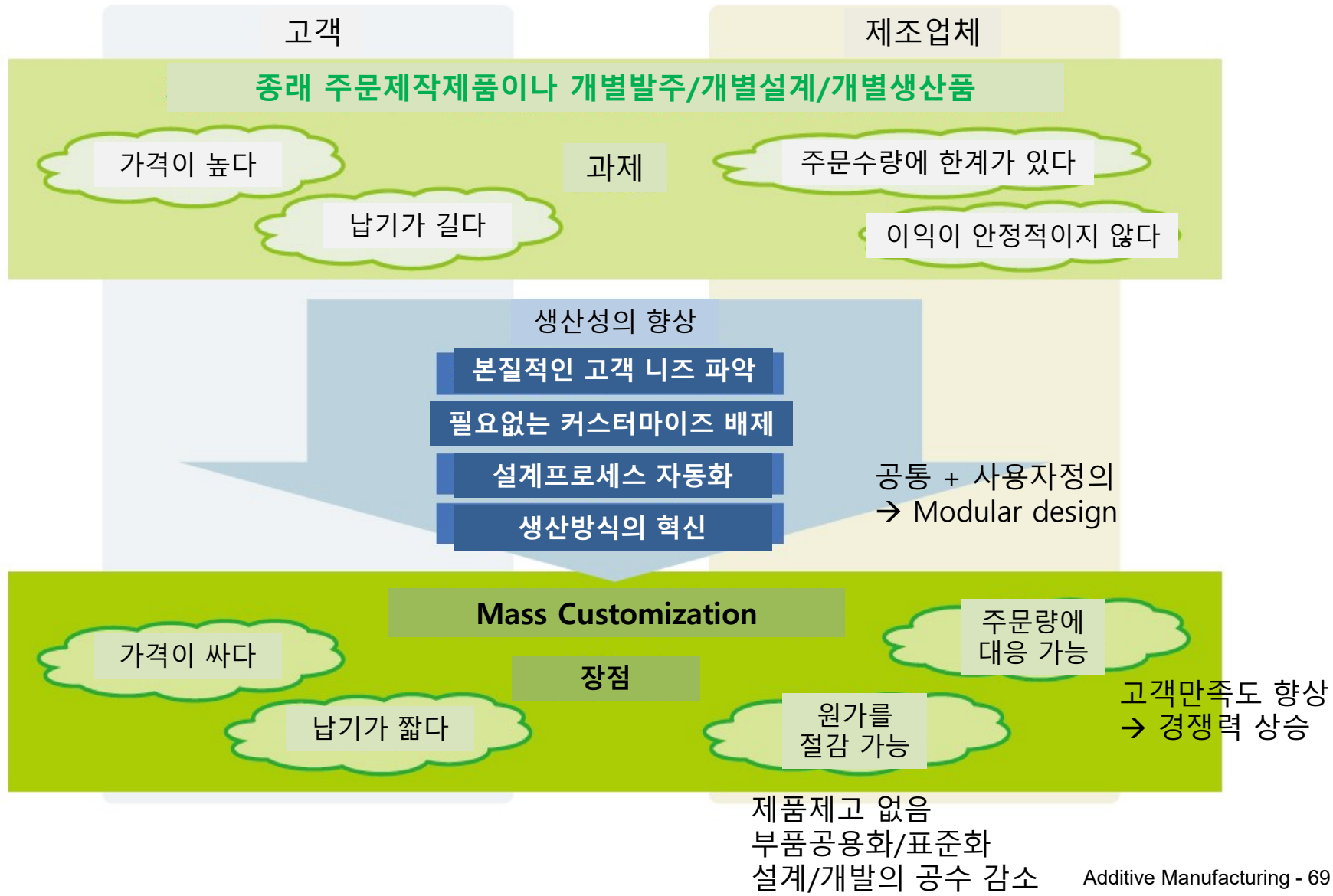
스포츠용 의족



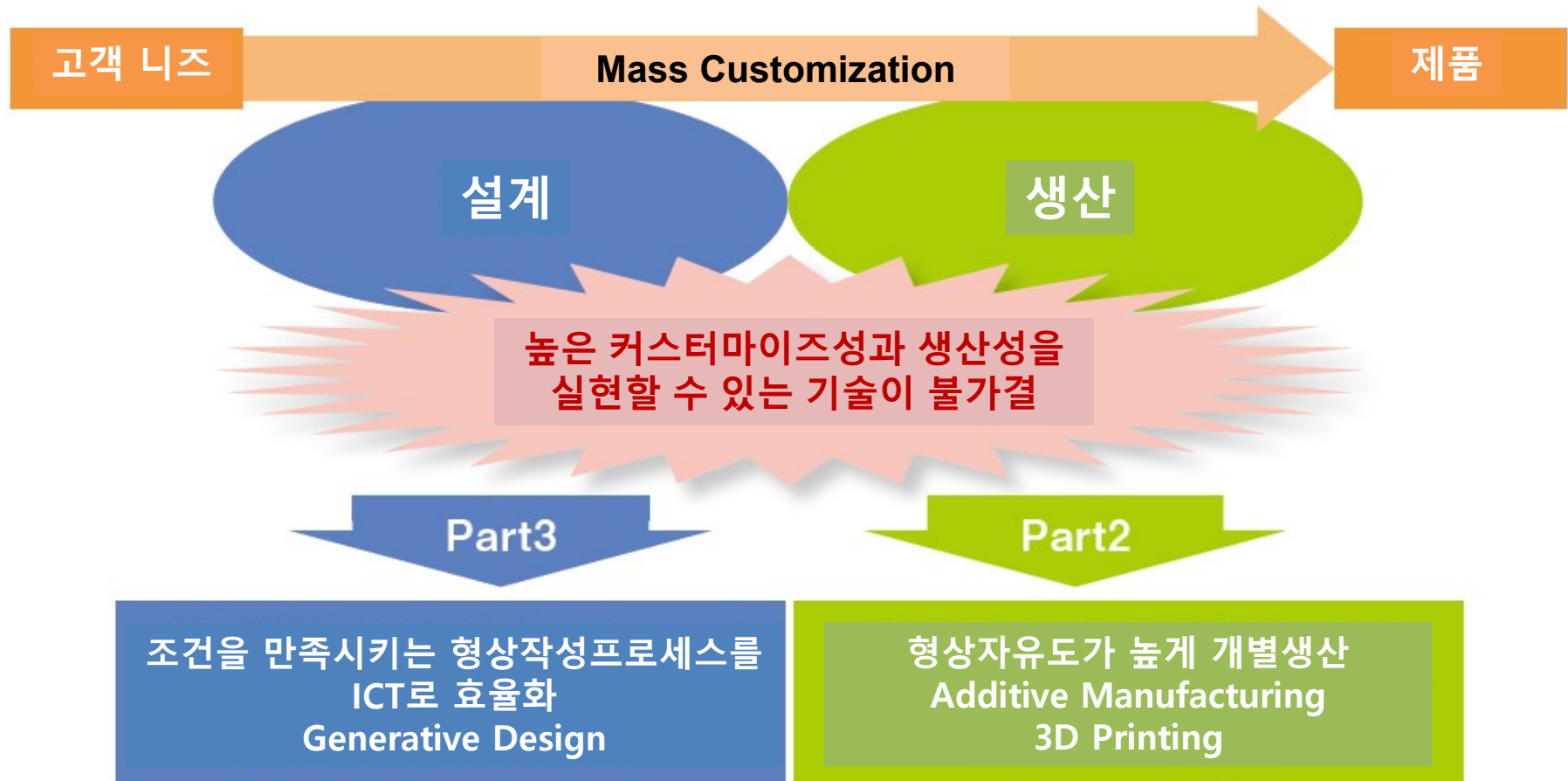
치과교정기구



# 생산성 향상에 따른 장점

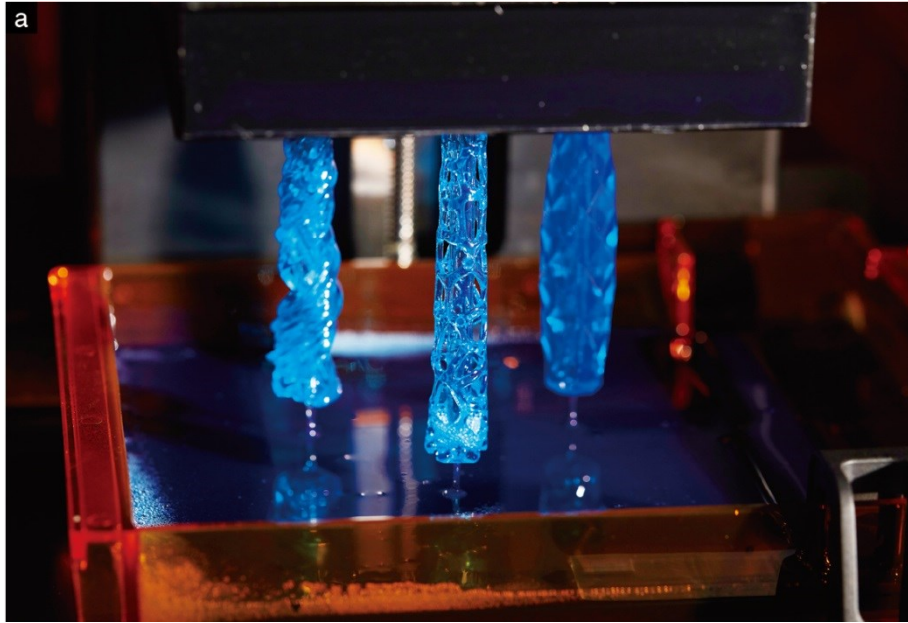


# Mass Customization을 가속시키는 신기술

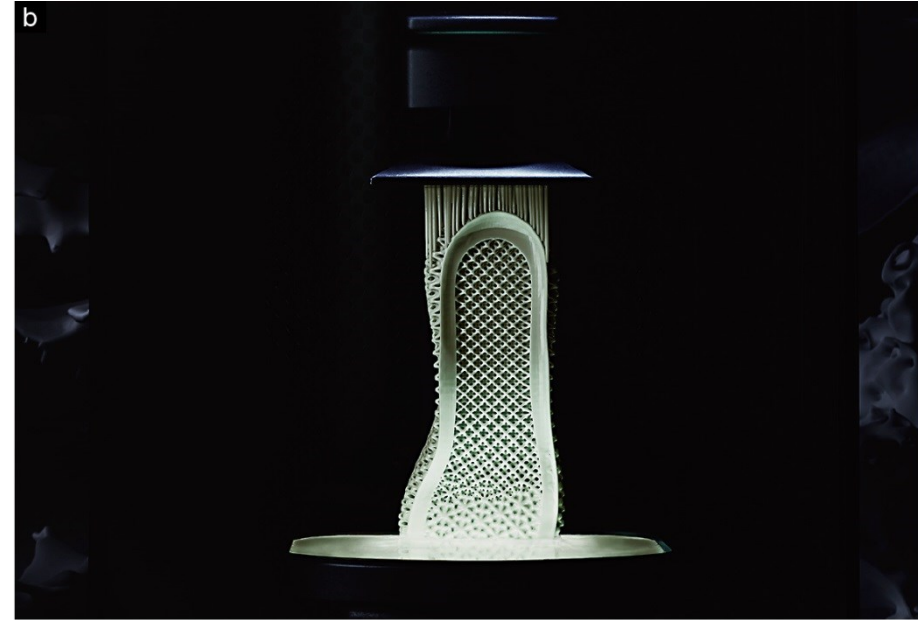


GD는 절삭가공/사출성형으로 만들 수 없는 형상을 도출하는 경우가 있어, AM의 형상자유도가 큰 힘이 된다. AM으로 실현가능한 복잡한 형상, 예를 들어 미세한 메쉬구조 (격자구조) 등을 인간의 손으로 모델링하는 것은 어렵다. 이 점에서 컴퓨터에서 형상데이터를 만드는 GD는 AM의 능력을 살리는 데 필요한 수단이다.

# AM장비를 통한 Mass Customization품의 생산



Gillette 면도기 핸들  
Formlabs (미국)



Adidas midsole "Futurecraft 4D"  
CARBON (미국)

# AM의 특징

## Additive Manufacturing (AM) 3D Printing

기본원리: 단면형상의 적층

형상데이터(3D data)를 직접 이용 가능

형상데이터 완성후,  
제조개시까지 시간이 짧다

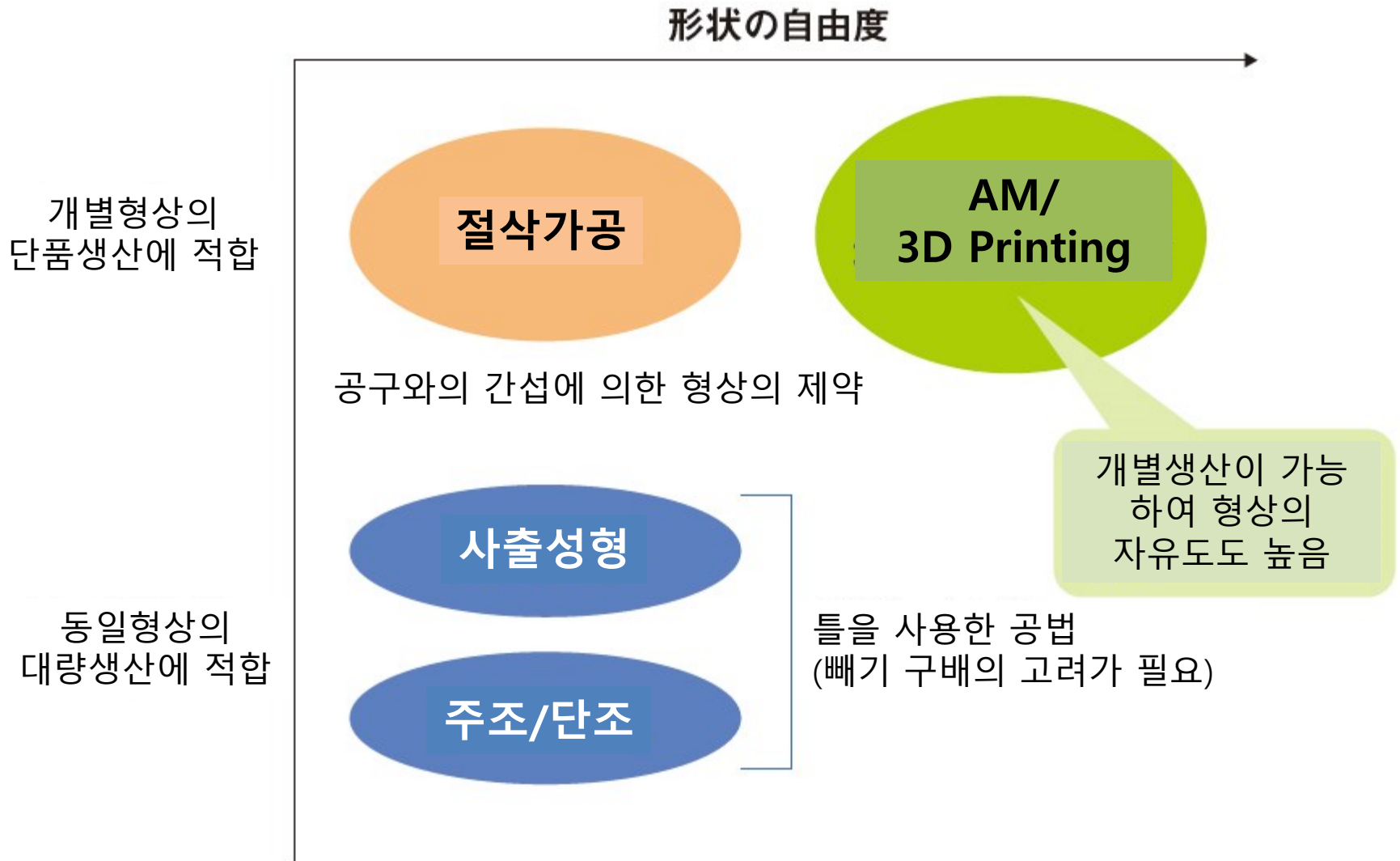
형상변경이 용이

금형과 같은  
초기비용이 불필요

1개씩 다른 형상의  
생산에 적합

**Mass Customization에 적합한 생산방법**

# AM의 위치



# AM의 일반적 프로세스

## 전 공정

조형조건의 조정  
조형데이터의 작성  
조형plate의 설치  
재료의 공급



AM장비를 통한  
조형






## 후 공정

Support부의 제거  
미경화재료의 회수  
경화의 촉진  
열처리  
기계가공

[생산성 향상 방안]

- 조형속도의 향상
- 여러 조형장비를 조합해 연속조형이 가능한 시스템
- 조형의 주변공정도 포함해 모듈화한 생산라인 구축

# 조형속도 향상

- 조형영역 내에 여러 개의 부품을 배치하여 한번 조형하는 것으로는 생산성 향상에 한계
- EOS(독일) LaserProFusion (2018.11)  PBF
  - Laser 수 증가: 100만개의 VCSEL(면발광레이저)를 집약한 3456 픽셀의 조형헤드로 부터 조사 (10배 향상)
- Carbon(미국)  Vat Photo-polymerization
  - MINI의 내외장부품, Adidas의 midsole
  - 층간 경화 시간 손실 억제, 열경화성 수지 사용, 조형 후 오븐 가열
- 금속분말을 결합제로 굳힌 후 소결시키는 방식  Binder Jetting
  - HP(미국) Metal Jet
  - Desktop Metal(미국) Production System: 12,000cm<sup>3</sup>/hr



# 여러 AM장비를 조합 / 모듈화

- TRIDITIVE(스페인) AMCELL
  - 컨베이어벨트를 사이에 두고 AM장비(FD) 여러 대 배치
  - AM장비 간에는 로봇배치, 조형plate 탈착
- 3D Systems(미국) Figure4 Production
  - 조형모듈(VPP)을 여러 개 연결
  - 조형plate의 탈착과 모듈 간 이동은 자동화
- Additive Industries(네덜란드) MetalFAB1
  - 조형모듈(PBF) + 열처리 + 분말회수

